Centre de recherche
informatique de Montréal

TP 10204F

Library and Information Centre /
Centre de Documentation
RECEIVED - REÇU LE
JUL 26 1990
Transport Canada / Transports Canada

CA1
DTC800-
90
D27
v.1

443714

41.D

# Développement d'un système expert pour les prévisions météorologiques des aéroports Phase I

par
Yves Chartier, André Cotnoir
Michel Desmarais, Frances de Verteuil
Nathalie Gauthier, Denis Jacob, Peter Zwack

Centre de recherche informatique de Montréal

Février 1990

443714

90-07189/

**AVERTISSEMENT** Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports, Groupe des politiques et de la coordination, Transports Canada.

An English summary of this report is included immediately preceding the table of contents.

Les participants pour ce projet:

**CENTRE DE RECHERCHE INFORMATIQUE DE MONTRÉAL**
Michel Desmarais, Ingénieur de la connaissance
Frances de Verteuil, Gestionnaire de projet
Alain Leblanc, Analyste en intelligence artificielle
Denis Mailloux, Analyste en intelligence artificielle
Jacques Ouellet, Vice-président, Exploitation

**MÉTÉOGLOBE CANADA INC.**
Daniel Caya, Analyste en météorologie
Yves Chartier, Analyste en météorologie

**ENVIRONNEMENT CANADA**
**SERVICES DE L'ENVIRONNEMENT ATMOSPHÉRIQUE**
Bruno de Lorenzis, Comité de revision technique
Denis Jacob, Expert météorologue
Carr McLeod, Gestionnaire technique de projet

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL**
Michel Desgagné, Étudiant de 2$^{e}$ cycle en météorologie
Nathalie Gauthier, Étudiante de 2$^{e}$ cycle en météorologie
Peter Zwack, Professeur au département de physique, Consultant

**TRANSPORTS CANADA**
Howard Posluns, Centre de développement des transports, Délégué scientifique
Branimir Dulic, Groupe de l'aviation, Comité de revision technique
Gilles Fournier, Groupe de l'aviation, Comité de revision technique

**UNIVERSITÉ McGILL**
Monroe Newborn, Professeur au département d'informatique, Consultant

Transports Canada Transport Canada

# FORMULE DE DONNÉES POUR PUBLICATION

| 1. N° de la publication de Transports Canada | 2. N° de l'étude | 3. N° de catalogue du destinataire |
|---|---|---|
| TP 10204F | 7312/13/14/15/16/17 | |

| 4. Titre et sous-titre | 5. Date de la publication |
|---|---|
| Développement d'un système expert pour les prévisions météorologiques des aéroports | Février 1990 |
| | 6. N° du document de l'organisme exécutant |

| 7. Auteur(s) | 8. N° de dossier — Transports Canada |
|---|---|
| Yves Chartier, Michel Desmarais, Peter Zwack, André Cotnoir, Frances de Verteuil, Denis Jacob, Nathalie Gauthier | D-1455-215 |

| 9. Nom et adresse de l'organisme exécutant | 10 N° de dossier — ASC |
|---|---|
| Centre de recherche informatique de Montréal<br>1550 ouest, boul. de Maisonneuve<br>Suite 1000<br>Montréal (Québec)<br>H3G 1N2 | 16SD. T8200-9-9504 |
| | 11. N° de contrat — ASC ou Transports Canada<br>T8200-9-9504/01-SD |

| 12. Nom et adresse de l'organisme parrain | 13. Genre de publication et période visée |
|---|---|
| Centre de développement des transports (CDT)<br>200 ouest, boul. René-Lévesque<br>Tour ouest, suite 601<br>Montréal (Québec)<br>H2Z 1X4 | Rapport final |
| | 14. Agent de projet<br>Howard Posluns |

15. Remarques additionnelles (Programmes de financement, titres de publications connexes, etc.)

16. Résumé

Ce rapport résume la première phase d'un projet qui avait pour but d'élaborer, de développer et d'évaluer un prototype de système expert consultatif, basé sur des principes physiques, afin d'assister le météorologue dans la réalisation de prévisions météorologiques pour les aéroports. Les objectifs techniques de cette phase étaient de réaliser un prototype consultatif capable de prédire la base et le sommet des nuages bas, à l'exception des nuages formés par convection profonde. Le prototype, basé sur des règles qualitatives pour les nuages bas, utilise le modèle numérique aux éléments finis régionaux comme source de données et est mis en application dans l'environnement du système expert "Knowledge Craft", sur un "TI Explorer". Les conclusions tirées de la validation ont démontré que les sorties du modèle aux éléments finis régionaux ne sont pas toujours assez précises pour être utilisées comme seule source d'information et que le modèle basé sur les règles qualitatives des nuages bas produit des prévisions réalistes seulement si les valeurs des quatre paramètres dérivés sont précises.

| 17. Mots clés | 18. Diffusion |
|---|---|
| système expert<br>principes physiques<br>nuages bas<br>prévisions météorologiques des aéroports | Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires |

| 19. Classification de sécurité (de cette publication) | 20. Classification de sécurité (de cette page) | 21. Déclassification (date) | 22. Nombre de pages | 23. Prix |
|---|---|---|---|---|
| Non classifiée | Non classifiée | ---- | 346 | ---- |

CDT/TDC 79-005
Rev 88



Canada

Transport Canada / Transports Canada

# PUBLICATION DATA FORM

| 1. Transport Canada Publication No. | 2. Project No. | 3. Recipient's Catalogue No. |
|---|---|---|
| TP 10204F | 7312/13/14/15/16/17 | |

**4. Title and Subtitle**

Développement d'un système expert pour les prévisions météorologiques des aéroports

**5. Publication Date**

February 1990

**6. Performing Organization Document No.**

**7. Author(s)**

Yves Chartier, Michel Desmarais, Peter Zwack, André Cotnoir, Nathalie Gauthier, Denis Jacob, Frances de Verteuil

**8. Transport Canada File No.**

D-1455-215

**9. Performing Organization Name and Address**

Centre de Recherche informatique de Montréal
1550 de Maisonneuve Blvd. West
Suite 1000
Montréal, Québec
H3G 1N2

**10. DSS File No.**

16SD.T8200-9-9504

**11. DSS or Transport Canada Contract No.**

T8200-9-9504/01-SD

**12. Sponsoring Agency Name and Address**

Transportation Development Center (TDC)
200 René-Lévesque Blvd. West
Suite 601, West Tower
Montréal, Québec
H2Z 1X4

**13. Type of Publication and Period Covered**

Final Report

**14. Project Officer**

Howard Posluns

**15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.)**

**16. Abstract**

This report describes the first phase of a project, to design, develop and test a prototype expert advisory system, based on physical processes, to assist the meteorologist in the production of airport terminal weather forecasts. The technical objective for this phase was the production of a prototype forecaster, based on physical principles, able to forecast the bases and tops of low clouds, except clouds formed by deep convection. The prototype, a qualitative rule-based model for low clouds uses the Canadian regional finite element forecast model for the required input data. It is implemented in Knowledge Craft , an expert system shell, on a TI Explorer. The conclusions of the validation process are that while the qualitative rule-based low cloud model produces realistic low cloud forecasts given accurate input data, the output of the Canadian regional finite element forecast model is not always precise enough to be used as the sole source of data.

| 17. Key Words | 18. Distribution Statement |
|---|---|
| expert system<br>physical principles<br>low cloud<br>terminal weather forecasts | Limited number of copies available from the Transport Development Centre |

| 19. Security Classification (of this publication) | 20. Security Classification (of this page) | 21. Declassification (date) | 22. No. of Pages | 23. Price |
|---|---|---|---|---|
| Unclassified | Unclassified | --- | 346 | --- |

TDC/CDT 79-005
Rev 88



Canada

## REMERCIEMENTS

Nos remerciements s'adressent à tous les membres de l'équipe multidisciplinaire et tout particulièrement à monsieur Denis Jacob, l'expert météorologue, pour son engagement et son dévouement à l'égard de ce projet. Nous tenons aussi à souligner que son intérêt soutenu envers l'aspect technologique de ce projet a été grandement apprécié.

## SOMMAIRE

Une proposition spontanée a été soumise conjointement par le CRIM et Météoglobe Canada Inc. au ministère d'Approvisionnements et Services Canada (ASC) en avril 1988. L'objectif de cette proposition était d'élaborer, de développer et de mettre à l'essai un prototype de système expert consultatif pour les prévisions météorologiques, basé sur des principes physiques, afin d'assister le météorologue dans la réalisation de prévisions météorologiques pour les aéroports. La proposition a été acceptée, mais à cause des restrictions budgétaire le projet a été divisé en deux phases. La première, subventionnée par Transports Canada et les Services de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada, a débuté en juillet 1989 et s'est terminée en mars 1990. Ce rapport résume les activités de la Phase I qui ont été réalisées par une équipe multidisciplinaire formée de quinze membres. Les principaux objectifs de la Phase I étaient les suivants:

1. Réaliser un prototype consultatif pour les prévisions météorologiques, basé sur des principes physiques et capable de prédire la base et le sommet des nuages bas, sauf pour les nuages formés par convection profonde.

2. Préparer et soumettre une proposition détaillée sur la Phase II au ASC.

Le prototype, un modèle basé sur des règles qualitatives pour les nuages bas, utilise les données du modèle aux éléments finis régionaux modifiées, lorsque nécessaire, par des heuristiques. La quantité, la hauteur, la base, le sommet et la variabilité des nuages bas sont prédits selon les règles physiques fondamentales qui gouvernent l'existence des nuages bas. Le prototype fournit la composante traitant des nuages bas dans les prévisions de 24 heures pour les aéroports. Ce prototype est mis en application dans l'environnement du système expert "Knowledge Craft", sur un "TI Explorer". Le prototype de prévisions météorologiques est facilement adaptable à différents sites parce qu'il est structuré à partir des règles physiques fondamentales qui gouvernent l'existence des nuages bas. Ceci va à l'encontre des techniques statistiques et de reconnaissance de formes, présentement utilisées pour le développement de la plupart des autres systèmes experts en météorologie. Ces systèmes, reproduisent les aptitudes d'un météorologue en particulier pour un site spécifique. L'approche utilisée dans ce projet, nommé STRATUS, est de simuler qualitativement certains phénomènes qui ne font pas partie des modèles numériques, lesquels sont implicitement utilisés par le météorologue pour ses prévisions. Le système

expert OASIS, le prototype pour l'étude des faisabilités, développé par le CRIM et Météoglobe Canada Inc. lors d'un projet en commun d'une durée de cinq mois, a été utilisé comme point de départ. Les objectifs spécifiques qui ont été identifiés dans les premiers mois de la Phase I sont les suivants:

1. La validation du modèle qualitatif de nuages bas à partir de quatre paramètres dérivés.

2. Élaboration des règles/algorithmes, les règles des paramètres, permettant d'obtenir les quatre paramètres dérivés requis par le modèle des nuages bas à partir des sorties du modèle aux éléments finis régionaux et d'observations.

3. Évaluation de la fiabilité des sorties du modèle aux éléments finis régionaux requises pour le prototype de nuages bas.

4. Développement d'un système efficace de traitement de données, incluant le transfert de données à partir du Centre météorologique canadien jusqu'au système de développement.

5. Développement de programmes utilitaires afin d'assister les météorologues dans le diagnostic et l'analyse de données.

6. Sélection d'une plate-forme de livraison

Tous les objectifs fixés pour la Phase I ont été atteints avec succès et, dans certains cas, ont même surpassé les prévisions. Les principales conclusions tirées de la validation ont démontré que le modèle basé sur les règles qualitatives des nuages bas produit des prévisions réalistes seulement si les valeurs des paramètres dérivés sont précises et que les sorties du modèle aux éléments finis régionaux ne sont pas toujours assez précises pour être utilisées comme seule source d'information. Une des premières tâches de la Phase II sera la mise en application et la validation, sur la plate-forme de livraison, du modèle amélioré de nuages bas avec six paramètres dérivés. Une quantité considérable d'efforts seront aussi mis en oeuvre pour le développement et la mise en application de modèles fournissant des estimés plus réalistes pour les paramètres physiques requis par le modèle de nuages bas. Dans un avenir plus éloigné, il serait souhaitable d'incorporer au système des informations fournies par satellite et par radar afin d'améliorer les prévisions météorologiques.

## SUMMARY

An Unsolicited Proposal (UP) was jointly submitted by CRIM and Météoglobe Canada Inc. to the Department of Supplies and Services (DSS) in April 1988. The objective of this proposal was to design, develop and test a prototype expert advisory system, based on physical processes, to assist the meteorologist in the production of airport terminal weather forecasts. The proposal was approved in principle but, due to budgetary constraints, was divided into two phases. The first phase, funded by Transport Canada and the Atmospheric Environment Services of Environment Canada, was started in July 1989 and completed in January 1990. This report summarizes the activities of Phase I, carried out by a multi-disciplinary team of fifteen. The main objectives for Phase I were:

1. To produce a prototype forecaster, based on physical principles, able to forecast bases and tops of low clouds, except clouds formed by deep convection.

2. To prepare a detailed proposal for DSS for Phase II of the project.

The prototype, a qualitative rule-based model for low clouds, uses the Canadian regional finite element forecast model data, modified when appropriate by heuristics. The amount, height, bases, tops and variability of low clouds is forecasted based on the fundamental physical rules that govern the existence of clouds. The prototype provides the low cloud component of the 24 hour forecast terminal (FT). It is implemented in Knowledge Craft , an expert system shell, on a TI Explorer. The forecaster is easily adaptable to new locations as it is structured on the fundamental physical rules that govern the existence of low clouds. This is in contrast with the statistical and pattern matching techniques, currently used in the development of most other meteorological expert systems. Such expert systems replicate the ability of a particular meteorologist for a specific location. The approach used in this project, named STRATUS, is to simulate qualitatively the physics of certain phenomena, not included in the numerical models, which the meteorologist uses implicitly for his predictions. OASIS, the

feasibility expert system prototype, developed by CRIM and Météoglobe Canada Inc. during a five-month joint project, was used as the starting point. The specific objectives for Phase I, established during the first few months of the project, were :

1. The validation of the qualitative rule-based model used to predict low clouds given four derived parameters.

2. The derivation of rules/algorithms, parameter rules, to go from the Canadian regional finite element forecast model data and observable data to the derived parameters required by the low cloud model.

3. An assessment of the validity of the numerical model data output required for the low cloud prototype.

4. To develop an efficient data management system, which includes the transfer of data from the Canadian Meteorological Center to the development workstation.

5. Tools to aid the meteorologists in the diagnosis and analysis of the data.

6. To select a delivery platform.

All the objectives set for Phase I have been successfully met and, in several areas, even exceeded expectations. The conclusions of the validation process are that while the qualitative rule-based low cloud model produces realistic low cloud forecasts given accurate input data, the output of the Canadian regional finite element forecast model is not always precise enough to be used as the sole source of data. One of the first tasks in Phase II will be the implementation and validation of the improved low cloud model with six derived parameters on the delivery hardware. A considerable amount of effort will also be spent to develop and implement models that provide more realistic estimates for the physical parameters required by the low cloud model. In the longer term, it is hoped to incorporate satellite and radar data into the system, in order to improve the prototype's forecasting capability.

# TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

PARTIE A

Représentation de données dans un système expert pour la prévision météorologique
par: Yves Chartier

Annexe 1 Acquisition des données
Annexe 2 Spécifications de la grille utilisée pour OASIS
Annexe 3 Conversion des sorties du modèle EFR de coordonnées sigma en coordonnées de pression

PARTIE B

Développement d'un module calculant les flux de chaleur et la turbulence dans la couche de surface pour le projet STRATUS
par: Nathalie Gauthier

Annexe 1 Organigramme de la version initiale de surface.FOR
Annexe 2 Paramétrisation du couvert végétal selon DEARDOFF (1978)
Annexe 3 Nouveaux paramètres d'entrée de surface.FOR
Organigramme de la nouvelle version de surface.FOR incluant la paramétrisation du couvert végétal

PARTIE C

Organigramme de la base de connaissance
par: André Cotnoir et Peter Zwack

Annexe 1 Règles de prévision de l'étendue des nuages dans la CLA

PARTIE D

Validation d'un modèle qualitatif de diagnostic des nuages bas
par: Michel Desmarais, Denis Jacob et Peter Zwack

PARTIE E

Architecture de la banque de données
par: Michel Desmarais

PARTIE F

Compression des sorties du modèle EFR
par: Yves Chartier

PARTIE G

Programmes utilitaires
par: Yves Chartier

# INTRODUCTION

Une proposition spontanée a été soumise conjointement par le CRIM et Météoglobe Canada Inc. au ministère d'Approvisionnements et Services Canada (ASC) en avril 1988. L'objectif de cette proposition était d'élaborer, de développer et de mettre à l'essai un prototype de système expert consultatif pour les prévisions météorologiques, basé sur des principes physiques, afin d'assister le météorologue dans la réalisation de prévisions météorologiques pour les aéroports. La proposition a été acceptée, mais à cause de restrictions budgétaires, le projet a été divisé en deux phases. La première, subventionnée par Transports Canada et les Services de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada, a débuté en juillet 1989 et s'est terminée en mars 1990. Le nom de STRATUS identifie ce projet. Ce rapport résume les activités de la Phase I et inclut une liste des quinze membres de l'équipe multidisciplinaire ayant contribué à la réalisation de ce projet. Les principaux objectifs de la Phase I étaient les suivants:

1. Réaliser un prototype consultatif pour les prévisions météorologiques, basé sur des principes physiques et capable de prédire la base et le sommet des nuages bas, sauf pour les nuages formés par convection profonde.

2. Préparer et soumettre une proposition détaillée sur la Phase II au ASC.

L'approche utilisée dans STRATUS est de simuler qualitativement certains phénomènes qui ne font pas partie des modèles numériques, lesquels sont implicitement utilisés par le météorologue pour ses prédictions. Le prototype est structuré à partir des principes physiques fondamentaux qui gouvernent l'existence des nuages bas et qui est donc facilement adaptable à différents sites. Ceci va à l'encontre des techniques statistiques et de reconnaissance de formes, présentement utilisées pour le développement de la plupart des autres systèmes experts en météorologie. Ces systèmes, reproduisent les aptitudes d'un météorologue en particulier pour un site spécifique. Le système expert OASIS, le prototype pour l'étude des faisabilités, développé par le CRIM et Météoglobe Canada Inc. lors d'un projet en commun d'une durée de cinq mois, a été utilisé comme point de départ. Les objectifs spécifiques qui ont été identifiés dans les premiers mois de la Phase I du projet sont les suivants:

1. La validation du modèle qualitatif de nuages bas à partir de quatre paramètres dérivés.

2. Élaboration des règles/algorithmes, les règles des paramètres, permettant d'obtenir les quatre paramètres dérivés requis par le modèle des nuages bas à partir des sorties du modèle aux éléments finis régionaux (EFR) et d'observations.

3. Évaluation de la fiabilité des sorties du modèle EFR requises pour le système de nuages bas.

4. Développement d'un système de traitement de données efficace, incluant le transfert de données à partir du Centre météorologique canadien jusqu'au système de développement.

5. Développement de programmes utilitaires afin d'assister les météorologues dans le diagnostic et l'analyse de données.

6. Sélection d'une plate-forme de livraison.

Ce rapport est divisé en plusieurs sections. Les premières décrivent les différentes tâches entreprises pour réaliser chacun des objectifs, ainsi que les ressources utilisées. La conclusion de ce rapport fait mention des objectifs de la Phase II.

## Modèle qualitatif pour les nuages bas

Comme il a été mentionné dans l'introduction, le modèle basé sur les règles qualitatives pour les nuages bas, OASIS, a servi de point de départ. Pour diagnostiquer les nuages bas, ce modèle utilise quatre paramètres qui s'obtiennent directement des sorties du modèle EFR. Ces paramètres sont le déficit du point de rosée, la hauteur de la couche limite, la stabilité au-dessus de la couche limite et le mouvement vertical. L'approche utilisée pour développer la base de connaissances d'OASIS est la suivante:

1. Déterminer les conditions physiques ou scénarios qui entraînent la formation de nuages bas.

2. Identifier les paramètres physiques qui sont déterminants pour la prévision des sommets, des bases et de l'étendue des nuages bas.

3. Définir les règles qui déterminent la relation entre les paramètres et la formation des nuages bas.

4. Représenter les règles et les relations établies sous forme d'organigrammes.

Les règles des nuages bas ont été délibérément simplifiées lors de la conception du prototype, sachant qu'elles seraient adaptées à mesure que des modifications seraient apportées aux organigrammes. Les organigrammes, ainsi que les règles utilisées pour la prévision des nuages bas se retrouvent à la partie C. Il est à noter qu'une quantité considérable de travail sur le modèle des nuages bas avait été accompli antérieurement au projet OASIS de CRIM/Météoglobe.

Le prototype OASIS a été mis en application en utilisant le "Knowledge Craft" sur une station de travail VAXstation II GPX de Digital en 1988, toutefois il n'a été validé que sur quelques cas seulement. Pour cette raison, une des tâches principales de la phase I était la validation du modèle. Pour faciliter la validation, le modèle amélioré OASIS, le premier prototype de STRATUS, a été mis en application dans l'environnement du système expert "Knowledge Craft" sur une station de travail "TI Explorer". Les conclusions tirées de la validation ont démontré que le modèle basé sur les règles qualitatives des nuages bas produit des prévisions réalistes seulement si les valeurs des paramètres dérivés sont précises et que les sorties du modèle EFR ne sont pas toujours assez précises pour être utilisées comme seule source d'information. Ceci a suscité le besoin de développer des règles/algorithmes, les règles de paramètres, afin de transformer les données des sorties du modèle EFR et des observations en paramètres dérivés, lesquels sont requis par le modèle des nuages bas. Les procédures utilisées pour la validation des règles de nuages bas et des paramètres se retrouvent à la partie D ainsi qu'une évaluation de la précision des sorties du modèle EFR.

Dans la phase II, le modèle de nuage bas sera amélioré. Le nombre de paramètres dérivés passera de quatre à six. Deux des paramètres originaux: la hauteur de la couche limite et la stabilité au-dessus de la couche limite, seront remplacés par quatre nouveaux paramètres dérivés. Les règles des nuages bas seront développées et perfectionnées afin d'inclure les nouveaux paramètres ainsi que les cas où la valeur du déficit de point de rosée et le mouvement vertical est très près de zéro. Les effets de la dépendance de température et du niveau de saturation de l'eau vont aussi être travaillés afin de produire une estimation plus précise du sommet des nuages. Une liste de recommandations se trouve à la partie D.

Ensuite, la première étape sera la mise en application de ce modèle amélioré sur la plate-forme de livraison. La deuxième étape consistera à établir les métriques de validité des résultats et la performance générale de ce prototype de système expert.

## Données météorologiques

Une description détaillée du travail accompli sur la structuration et la conversion des données météorologiques sous un format approprié pour un système expert se retrouve à la partie A. Ce travail a été accompli lors du projet OASIS de CRIM/Météoglobe et est inclus comme document de référence à la demande de Services de l'environnement atmosphérique (SEA). Au début de la phase I, le modèle EFR et les données d'observations requises pour OASIS prenaient sept heures pour être transférées du Centre météorologique canadien sur quatre lignes à 2400 bauds. Un programme de compression de données, décrit à la partie F, a permis de réduire le temps de transfert par un facteur sept. En janvier, une autre importante réduction du temps de transfert a été accomplie en utilisant la connexion de 56 000 bauds entre le CRIM et le CMC, qui fait partie du Réseau interordinateurs scientifique québécois (RISQ). Avec cette nouvelle ligne les données en format compressé ont été transférées en trois minutes. À la mi-février, le transfert des données du CMC au CRIM a été automatisé. L'objectif d'avoir accès aux données requises pour le prototype avec six heures de retard sur le temps réel a été largement atteint.

## Système de traitement des données

Une seule journée de données consiste en un minimum de 2.5M octets. OASIS a utilisé la banque de données de schémas de "Knowledge Craft" pour organiser les données. Toutefois, le procédé utilisé pour la conversion des données dans un format approprié pour les schémas a été lent et laborieux. De plus, il fallait plus d'une demi-heure pour mettre en mémoire l'équivalent d'une journée complète de données. Pour STRATUS, une telle performance est inacceptable; les données étant largement utilisées par le module du système expert en plus d'être requises pour les programmes utilitaires de l'interface usager. La décision de développer une banque de données en C a été prise. Les données requises pour STRATUS proviennent de trois sources, le modèle EFR, les observations de surface et les sondages aérologiques. Chacun des paramètres physiques peut être indexé dans les quatre dimensions: temps, hauteur, latitude et longitude. Une banque de données à accès aléatoire, où chaque enregistrement possède six indices, a été programmée en C. Avec ce système, il est maintenant possible de mettre en mémoire l'équivalent d'une journée de

données en seulement 10 secondes. L'accès à un enregistrement particulier se fait en seulement 10 millisecondes . Les détails techniques se trouvent à la partie E.

### Plate-forme de livraison

Pour des raisons externes, OASIS a été développé en utilisant le "Knowledge Craft" sur une station de travail VAX/VMS. Durant la phase I, le travail de développement a été poursuivi en utilisant "Knowledge Craft" sur une station de travail VAX ainsi que sur une station de travail "TI Explorer". Aucun de ces systèmes n'a été considéré approprié pour la plate-forme de livraison en raison de leurs performances et de leur coût. Il est devenu apparent que même si le "Knowledge Craft" fournit un environnement de développement riche et intégré, l'utilisation de cette richesse n'était pas suffisante pour justifier la grande perte de performance reliée à son utilisation. Avec STRATUS, la fonctionnalité requise par chaque module déterminera le langage de développement. Parce que UNIX devient le système d'exploitation standard au CRIM ainsi qu'à Environnement Canada, il a été décidé que le système d'exploitation de la plate-forme de livraison sera UNIX. Afin de faciliter les partages futurs de code avec SEA, une station de travail, de la série 9000 de Hewlett-Packard, a été choisie comme plate-forme de livraison. Une station de travail HP, modèle 375, comportant une mémoire de 24M octets et un espace de disque de 1G octets a été commandée, la livraison est prévue pour la fin du mois de mars 1990. Pour le moment le travail de développement du prototype se poursuit sur des terminaux "X" et sur des stations de travail "RISC" que le CRIM a mis en disponibilité pour le projet.

### Sortie du modèle aux éléments finis régionaux

Durant le projet OASIS, il a été constaté que les sorties du modèle EFR ne sont pas toujours assez précises pour être utilisées comme la seule source d'information pour le module des nuages bas. Donc, une des premières tâches pour STRATUS a été d'établir des procédures d'évaluation de la validité des paramètres des sorties du modèle EFR. Le premier paramètre à être évalué a été le mouvement vertical. Les deux problèmes majeurs sont reliés à un problème de démarrage "spin-up" qui prend de 3 à 6 heures pour se stabiliser, ainsi qu'à la présence d'oscillations d'environ 1 µbars/seconde dans le mouvement vertical. Pendant la phase I, un algorithme a été développé afin de diminuer ces oscillations, mais cette méthode n'a donné aucun résultat satisfaisant. Une autre approche, plus théorique, est présentement mise en application. Si elle s'avère performante, elle sera intégrée au module des nuages bas lors de la Phase II. Le module de

Couche limite planétaire (CLP) du modèle EFR n'est pas adéquat pour la prévision des nuages bas. Nous travaillons présentement à l'adaptation du module CLP du modèle EFR pour des fins de prévisions. Dans la phase II, le nouveau modèle de CLP sera évalué, puis sera ensuite mis en application dans le système. Le modèle EFR est déficitaire en énergie thermique et pour cette raison il donne des températures trop froides. Dans la phase II, l'approche sera de prendre la température initiale à partir d'observations réelles et d'utiliser la tendance du modèle EFR pour les besoins de prévisions. Les effets de la température provenant du module de CLP seront intégrés lorsqu'ils deviendront disponibles. Le travail actuel en ingénierie de la connaissance déterminera dans quel ordre les autres paramètres du modèle EFR seront évalués.

### Programmes utilitaires

Au cours du projet, il est devenu évident qu'un certain nombre de programmes utilitaires, diagnostiques et analitiques, seraient requis afin d'assister le travail des météorologues. Le système de fenêtres "X" a été choisi comme standard graphique. Des exemples des deux programmes utilitaires développés à ce jour se trouvent à la partie G; il s'agit de:

1. Contours: une matrice de données qui est présentée sur une carte contourée.
2. Observations de surface: des observations de surface sont présentées sur des cartes.

Téphigrame, un programme utilitaire pour présenter les données des sondages aérologiques sur un téphigramme est présentement en développement. Plusieurs autres programmes utilitaires, pouvant être utiles, ont déjà été développés pour des fins d'usage interne au SEA. Il est à espérer que ces programmes utilitaires seront mis à la disposition du projet lors de la Phase II, ce qui résulterait en une économie de temps de programmation.

### Ressources utilisées

Le budget initial de la Phase I était de 246,619$. Lors de sa révision en janvier 1990, il est passé à 281,396$ afin d'inclure une partie du coût d'achat de la plate-forme de livraison proposée; soit une station de travail HP de modèle 375. La date limite du projet a été officiellement reporté au 31 mars 1990 à cause des dates de livraison de la plate-forme de livraison. Le travail de la Phase I du projet, incluant la planification des deux premiers mois de la Phase II, seront complétés à la fin février au lieu de la fin janvier, date qui avait été originallement planifiée. Toutefois, le budget global du projet fut respecté parce que le

CRIM assume toutes les dépenses excédentaires au budget approuvé. Le CRIM a donc mis en disponibilité plusieurs terminaux "X" et une station de travail "RISC" en plus d'asssumer des coûts additionnels de main-d'oeuvre. Les différentes approches vis-à-vis certaines tâches, envisagées lors de la proposition, ont nécessité des changements de personnel, lesquels figurent aux procès verbaux des réunions de projet. Une liste complète des participants est inclue dans ce rapport.

## Conclusion

Tous les objectifs fixés pour la Phase I ont été atteints avec succès et, dans certains cas, ont même surpassé les prévisions. Les principales conclusions tirées de la validation ont démontré que le modèle basé sur les règles qualitatives des nuages bas produit des prévisions réalistes seulement si les valeurs des paramètres dérivés sont précises et que les sorties du modèle EFR ne sont pas toujours assez précises pour être utilisées comme seule source d'information. Une des premières tâches de la Phase II sera la mise en application et la validation, sur la plate-forme de livraison, du modèle amélioré des nuages bas avec les six paramètres dérivés. Une quantité considérable d'efforts seront aussi mis en oeuvre pour le développement et la mise en application de modèles fournissant des estimés plus réalistes des paramètres physiques requis par le modèle des nuages bas. A plus long terme, il serait souhaitable d'incorporer au système des informations provenant d'obversations fournies par satellite et par radar afin d'améliorer les prévisions météorologiques.

# REPRÉSENTATION DES DONNÉES DANS UN SYSTÈME EXPERT POUR LA PRÉVISION MÉTÉOROLOGIQUE

PAR

YVES CHARTIER

Ce travail fait partie d'une thèse de maîtrise qui a été présentée au département d'informatique de l'université de Montréal en 1988

# Table des matières


Introduction ..... 1

Chapitre I Description du problème ..... 3

1.1 Le problème de la prévision météorologique ..... 3

1.2 Les besoins en expertise ..... 4

1.3 Présentation de quelques systèmes experts appliqués à la météorologie ..... 5

Chapitre II Présentation du projet OASIS ..... 8

2.1 Historique du projet OASIS ..... 8

2.2 Equipe de développement ..... 9

2.3 Tâches de l'auteur durant la réalisation du stage ..... 11

Chapitre III Représentation des données météorologiques ..... 12

3.1 Introduction ..... 12

3.2 Représentation de la connaissance par schémas ..... 12

3.3 Représentation des rapports horaires ..... 14

3.3.1 Description ..... 14

3.3.1.1 Distribution géographique ..... 14

3.3.1.2 Distribution temporelle ..... 15

3.3.1.3 Eléments météorologiques disponibles ..... 16

3.3.2 Modélisation conceptuelle ..... 16

3.3.2.1 Définition des classes ..... 16

3.3.2.2 Définition des attributs ..... 23

3.3.3 Transformation des rapports horaires bruts en schémas ..... 37

3.3.3.1 Format des rapports horaires bruts ..... 37

3.3.3.2 Vue d'ensemble des opérations de décodage ..... 38

3.3.3.3 Définition de schémas représentant les attributs météorologiques ..... 39

3.3.3.4 Sélection d'un fichier contenant des observations ..... 41

3.3.3.5 Décodage ..... 41

3.3.3.6 Vérification des valeurs ..... 42

3.3.3.7 Conversion d'unités et de symboles ..... 43

3.3.3.8 Définition de noms significatifs ..... 45

3.3.3.9 Archivage des schémas ..... 45

3.4 Représentation des sorties de modèles numériques ..... 47
3.4.1 Description ..... 47
3.4.1.1 Distribution géographique ..... 47
3.4.1.2 Distribution temporelle ..... 51
3.4.1.3 Eléments météorologiques disponibles ..... 51
3.4.2 Modélisation conceptuelle des schémas de sorties de modèles ..... 56
3.4.2.1 Définition des classes ..... 56
3.4.2.2 Définition des attributs ..... 63
3.4.3 Transformation des sorties de modèles en schémas ..... 73
3.4.3.1 Format des données brutes ..... 73
3.4.3.2 Vue d'ensemble des opérations ..... 78
3.4.3.3 Définition des schémas de la classe VARIABLE ..... 78
3.4.3.4 Sélection d'un fichier contenant des sorties de modèle ..... 79
3.4.3.5 Décodage ..... 79
3.4.3.6 Conversion d'unités ..... 83
3.4.3.7 Définition des schémas représentant les sorties du modèle pour l'aéroport de Dorval ..... 83
3.4.3.8 Archivage ..... 83
Chapitre IV Description du prototype ..... 86
4.1 Environnement informatique ..... 86
4.2 Architecture ..... 86
4.3 Règles ..... 87
4.4 Production d'une prévision de nuages bas ..... 91
Chapitre V Présentation des résultats ..... 92
5.1 Présentation du cas étudié ..... 92
5.2 Analyse de la situation météorologique à une échelle régionale ..... 93
5.2.1 Analyse des champs de pression au niveau de la mer ..... 93
5.2.2 Analyse des champs de hauteur du géopotentiel ..... 94
5.2.3 Analyse des champs de température ..... 94
5.2.4 Analyse des champs de dépression du point de rosée ..... 95
5.2.5 Analyse des champs de mouvement vertical ..... 96

5.3 Analyse de la situation météorologique à l'aéroport de Dorval ..... 97
5.3.1 Analyse des profils de température et d'humidité ..... 97
5.3.2 Analyse des profils du mouvement vertical ..... 98
5.4 Présentation des prévisions produites par OASIS ..... 98
Conclusion ..... 127
Bibliographie ..... 128
Annexe 1 Acquisition des données
Annexe 2 Spécifications de la grille utilisée par OASIS
Annexe 3 Conversion des sorties du modèle EFR de coordonnées sigma en coordonnées de pression

# Liste des figures


Figure 3.1 Exemple d'héritage hiérarchique de propriétés ..... 13
Figure 3.2 Réseau de stations synoptiques sur la grille d'OASIS ..... 15
Figure 3.3 Catégorisation selon le type de données ..... 17
Figure 3.4 Catégorisation des rapports horaires selon les pays ..... 18
Figure 3.5 Catégorisation des rapports horaires selon le type de station ..... 18
Figure 3.6 Catégorisation des rapports horaires selon les stations ..... 20
Figure 3.7 Instances de rapports horaires définies selon le temps des observations ..... 21
Figure 3.8 Réseau sémantique représentant les différentes classes de rapports horaires ..... 22
Figure 3.9 Représentation graphique d'un schéma ..... 24
Figure 3.10 Illustration du schéma SOURCE-DONNEES-METEOROLOGIQUES ..... 24
Figure 3.11 Illustration du schéma STATION-OBSERVATION ..... 24
Figure 3.12 Illustration de la classe de schémas STATION ..... 25
Figure 3.13 Illustration de la classe de schémas RAPPORT-HORAIRE-STATION ..... 27
Figure 3.14 Illustration d'une instance de la classe de schémas RAPPORT-HORAIRE-STATION ..... 27
Figure 3.15 Illustration de l'organisation hiérarchique des schémas de rapports horaires implantés dans le prototype ..... 36
Figure 3.16 Exemple de rapport horaire non décodé ..... 37
Figure 3.17 Illustration du processus de transformation des données brutes en schémas ..... 39
Figure 3.18 Structure des schémas utilisés pour l'identification des paramètres météorologiques dans les rapports horaires bruts ..... 40
Figure 3.19 Structure des schémas utilisés pour la conversion d'unités des paramètres météorologiques ..... 41
Figure 3.20 Illustration du processus de décodage des données brutes ..... 42
Figure 3.21 Exemple de schéma de rapport horaire archivé ..... 46
Figure 3.22 Illustration de la structure tri-dimensionnelle des sorties de modèles ..... 48

Figure 3.23 Hauteur des niveaux de pression dans l'atmosphère standard de l'OACI ..... 49
Figure 3.24 Comparaison entre les niveaux sigma et les niveaux standards sous 10 km ..... 50
Figure 3.25 Exemples de champs de pression ..... 53
Figure 3.26 Exemple de champs de géopotentiel à 1000 et 850 mb ..... 54
Figure 3.27 Exemples de champs de température ..... 54
Figure 3.28 Exemples de champs de dépression du point de rosée ..... 55
Figure 3.29 Exemples de champs de mouvement vertical ..... 56
Figure 3.30 Illustration de la catégorisation des sorties de modèles selon le pays d'origine ..... 57
Figure 3.31 Illustration de la catégorisation des sorties de modèles selon le modèle utilisé ..... 57
Figure 3.32 Illustration de la catégorisation des sorties de modèles selon la version du modèle ..... 58
Figure 3.33 Illustration de la catégorisation des sorties de modèles selon le post-traitement ..... 58
Figure 3.34 Illustration de la catégorisation des sorties de modèles selon les variables utilisées ..... 59
Figure 3.35 Illustration de la catégorisation des sorties de modèles selon les heures initiales et de validité de la prévision ..... 60
Figure 3.36 Illustration de la hiérarchie formée par l'ensemble des schémas ..... 61
Figure 3.37 Illustration de la classe de schémas SORTIE-MODELE-OASIS ..... 63
Figure 3.38 Illustration du schéma GRILLE-OASIS ..... 64
Figure 3.39 Illustration de la classe de schémas VARIABLE ..... 65
Figure 3.40 Illustration de la classe de schémas VARIABLE-HEURE-INITIALE ..... 67
Figure 3.41 Illustration d'une instance de la classe de schémas VARIABLE-HEURE-INITIALE définies sur la grille d'OASIS, pour un champ de surface ..... 69
Figure 3.42 Illustration d'une instance de la classe de schémas VARIABLE-HEURE-INITIALE définies sur la grille d'OASIS, pour une série de champs en altitude ..... 70
Figure 3.43 Illustration d'une instance de la classe de schémas VARIABLE-HEURE-INITIALE définies pour un point sur la grille ..... 71

Figure 3.44 Illustration de l'organisation hiérarchique des sorties de schémas implantées dans le prototype..... 72
Figure 3.45 Exemple des sorties brutes du modèle EFR ..... 73
Figure 3.46 Structure des descripteurs de champs du modèle ..... 74
Figure 3.47 Structure des valeurs aux points de grille ..... 77
Figure 3.48 Vue d'ensemble des opérations de transformation en schémas des sorties de modéles numériques..... 78
Figure 3.49 Illustration du processus de décodage des sorties brutes de modèles ..... 81
Figure 3.50 Exemple de schéma représentant les sorties du modèle pour l'aéroport de Dorval ..... 84
Figure 3.51 Exemple de schéma représentant les sorties du modèle pour la grille d'OASIS ..... 85
Figure 4.1 Organisation hiérarchique de la connaissance des phénomènes physiques causant les nuages bas..... 88
Figure 4.2 Présentation tabulaire de règles utilisées pour la prévision de l'étendue de nuages bas dans la couche limite turbulente..... 90
Figure 5.1 Evolution du champ de pression au niveau de la mer pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC..... 101
Figure 5.2 Evolution du champ de la hauteur du géopotentiel à 1000 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC ..... 102
Figure 5.3 Evolution du champ de la hauteur du géopotentiel à 850 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC..... 103
Figure 5.4 Evolution du champ de la hauteur du géopotentiel à 700 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC..... 104
Figure 5.5 Evolution du champ de température à 1000 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC..... 105
Figure 5.6 Evolution du champ de température à 850 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC..... 106
Figure 5.7 Evolution du champ de température à 700 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC..... 107
Figure 5.8 Evolution du champ de dépression du point de rosée à 1000 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC..... 108
Figure 5.9 Evolution du champ de dépression du point de rosée à 850 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC..... 109
Figure 5.10 Evolution du champ de dépression du point de rosée à 700 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC..... 110

Figure 5.11 Evolution du champ de mouvement vertical à 1000 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC....111
Figure 5.12 Evolution du champ de mouvement vertical à 850 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC....112
Figure 5.13 Evolution du champ de mouvement vertical à 700 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC....113
Figure 5.14 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 00 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988....114
Figure 5.15 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 03 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988....115
Figure 5.16 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 06 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988....116
Figure 5.17 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 09 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988....117
Figure 5.18 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 12 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988....118
Figure 5.19 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 15 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988....119
Figure 5.20 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 18 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988....120
Figure 5.21 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 21 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988....121
Figure 5.22 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 24 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988....122
Figure 5.23 Evolution de la température et du point de rosée à l'aéroport de Dorval aux niveaux 1000, 850 et 700 mb pour la prévision de 24 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988....123

Figure 5.24 Evolution du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval aux niveaux 1000, 850 et 700 mb pour la prévision de 24 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988 ..... 124

# Liste des tableaux


| | | |
|---|---|---|
| Tableau 3.1 | Liste des éléments météorologiques retenus pour le prototype | 16 |
| Tableau 3.2 | Phénomènes atmosphériques reliés aux précipitations | 31 |
| Tableau 3.3 | Phénomènes atmosphériques non reliés aux précipitations | 32 |
| Tableau 3.4 | Types de nuages rapportés dans les rapports horaires canadiens | 34 |
| Tableau 3.5 | Liste des méthodes utilisées pour déterminer le plafond | 35 |
| Tableau 3.6 | Liste des codes utilisés pour l'identification des attributs | 38 |
| Tableau 3.7 | Liste des opérations de conversions | 44 |
| Tableau 3.8 | Liste des variables du modèle EFR disponibles | 52 |
| Tableau 3.9 | Conversion d'unités pour les variables du modèle | 83 |
| Tableau 5.1 | Intensités de mouvement vertical définies dans OASIS | 96 |
| Tableau 5.2 | Prévisions de la hauteur et de l'étendue de nuages bas, pour chaque heure du cas du 3 juin 1988 à 00H00 TUC | 99 |
| Tableau 5.3 | Prévision émise par OASIS pour le cas du 3 juin 1988 à 00H00 TUC | 100 |

# Introduction

Ce document présente une partie du travail accompli dans le cadre du développement du projet OASIS. OASIS est un projet conjoint impliquant le Centre de recherche informatique de Montréal et la firme Météoglobe Canada, de Ville St-Laurent, membre industriel du CRIM. Le projet a débuté officiellement le 4 janvier 1988 pour se terminer le 31 mai 1988.

Ce projet visait deux objectifs. Le premier objectif était de présenter une proposition spontanée au ministère fédéral des Approvisionnements et services, demandant le support d'un projet conjoint CRIM/Météoglobe, d'une durée de trois ans, pour le développement d'un système expert appliqué à la production de prévisions météorologiques de type FT. Un FT est une prévision des conditions atmosphériques prévalentes dans un rayon de huit kilomètres autour d'un aéroport. Le deuxième objectif était de présenter une étude de faisabilité d'un tel système en développant un prototype appliqué à la prévision de nuages bas.

Les objectifs initiaux du prototype, tels que mentionnés dans le rapport d'étape produit par l'équipe d'OASIS en juin 1988 [Newborn, 88], étaient les suivants.

- Le prototype devrait prévoir la base, le sommet et l'étendue de nuages bas pour l'aéroport de Dorval, à toutes les heures, pour une période de 24 heures.
- Le prototype utiliserait les données dérivées des sorties du modèle numérique EFR et des rapports horaires émis par la station d'observation de Dorval.
- Le prototype devrait pouvoir démontrer son raisonnement.
- Le prototype devrait s'assurer que les conditions prévues au temps initial sont consistantes avec les observations les plus récentes.
- Les sorties du système apparaîtraient sous la forme d'un FT qui ne comprendrait que la hauteur et l'étendue des nuages bas.

Il était aussi convenu que le prototype serait programmé en LISP à l'aide de Knowledge Craft, un outil de développement de systèmes experts.

La contribution de l'auteur à ce projet concerne le deuxième point de ces spécifications, soit l'intégration des données météorologiques dans le prototype. Dans ce document nous donnerons d'abord une description du problème de la prévision météorologique, suivie de

quelques commentaires sur la pertinence de l'application des systèmes experts à la météorologie. Nous présenterons ensuite l'équipe de développement d'OASIS.

Le corps de ce document comprend une description détaillée des données disponibles, de même que de la méthode employée pour convertir les données brutes dans un format compatible avec celui demandé par le prototype. Nous donnerons ensuite une brève description des autres éléments qui composent le prototype, en portant une attention particulière à l'interaction entre les règles et les données. Nous ferons enfin une étude de cas détaillée des prévisions produites par OASIS.

# Chapitre I

# Description du problème

## 1.1 Le problème de la prévision météorologique

Il existe un proverbe en météorologie qui dit que la météorologie est une science, et que la prévision météorologique est un art. Les fondements de ce proverbe proviennent probablement des multiples difficultés que doivent rencontrer les météorologistes opérationnels dans l'exercice de leurs fonctions. Ceux-ci doivent assimiler en un temps restreint une quantité énorme de données, qui peuvent être de qualité très variable. Ces données arrivent sous différents formats, et souvent ne sont disponibles que sur des systèmes informatiques spécialement dédiés, ce qui complique leur utilisation.

Ces données comprennent:

- des rapports de stations d'observation
- des sondages aérologiques
- des images satellite
- des relevés radars
- des analyses manuelles et automatisées de diverses variables
- des pronostics manuels et automatisés de diverses variables

Toutes ces données doivent être analysées rapidement et simultanément de façon à produire une prévision dans les plus brefs délais. Par exemple, les météorologistes du Centre météorologique du Québec n'ont que deux heures suivant l'arrivée de nouvelles données pour préparer une vingtaine de prévisions aéronautiques. Ce travail demande une grande faculté d'assimilation, qui ne vient qu'avec une longue expérience.

Pour donner un aperçu de la tâche à accomplir, mentionnons que pour faire une prévision de 24 heures pour la région de Montréal, les météorologistes doivent suivre l'évolution du temps sur une superficie pouvant s'étendre, du nord au sud, de la terre de Baffin à la Floride, et de l'est à l'ouest, du Manitoba à la Nouvelle-Ecosse. Environ 600 stations d'observations, réparties sur ce territoire, émettent des rapports à toutes les heures. Une

cinquantaine de ces stations envoient des ballons-sonde, à toutes les 12 heures, pour estimer la distribution verticale de la température, de l'humidité et des vents.

Depuis la fin des années 60, les météorologistes ont à leur disposition d'autres sources de données, soit les satellites et les radars météorologiques. Ces sources de données sont très complexes à analyser. Leur relative abondance (les images satellites sont disponibles à toutes les 30 minutes, les relevés radars, à toutes les 10 minutes) rend leur analyse encore plus fastidieuse.

A ces données de base s'ajoute un vaste ensemble d'analyses et de prévisions automatisées représentant l'état présent et futur de différents paramètres météorologiques qui ont chacun un impact important sur les éléments du temps. Il existe plusieurs programmes informatiques (les modèles numériques) qui génèrent ces produits. Faute d'une théorie générale expliquant de façon satisfaisante tous les phénomènes atmosphériques, chacun de ces modèles fonctionne avec une représentation incomplète de la réalité. Il arrive souvent que l'état de l'atmosphère prévu par un modèle donné soit en désaccord avec celui prévu par un autre ; il revient alors à l'être humain de trancher en faveur de celui qui lui apparaît le plus réaliste.

Toutes ces sources de données transitent dans un environnement en temps réel, avec tous les problèmes que cela comporte, par exemple des pannes d'équipement et du bruit dans les communications.

## 1.2 Les besoins en expertise

Pour soulager le fardeau des météorologistes opérationnels, quelques bureaux météorologiques canadiens ont introduit des postes occupés par des experts, qui ne produisent pas des prévisions de routine, mais plutôt des produits spécialisés qui demandent beaucoup de temps à préparer. Par exemple, l'expert en poste peut conseiller l'équipe de prévision dans la prévision de certains éléments critiques du temps (orages violents, tornades, tempêtes de neige, pluie verglaçante, etc.) ou encore interpréter des données comme celles provenant des images satellite et des échos radars.

L'existence de ces postes d'experts tend à démontrer le besoin d'une expertise réelle qui devrait être constamment accessible. Les véritables experts demeurent cependant peu

nombreux dans le milieu. La plupart des météorologistes passent en effet relativement peu de temps en météorologie opérationnelle. Au hasard des ouvertures qui se présentent dans la fonction publique, la grande majorité d'entre eux n'hésitent pas à laisser la vie sur les quarts pour des postes de recherche et développement. De plus, les météorologistes sont sujets à de fréquentes mutations latérales, surtout au début de leur carrière. Comme la climatologie diffère grandement d'une région à l'autre, ils n'ont pas le temps d'accumuler une véritable expertise pour un endroit donné.

Le présent plan quinquennal du Service de l'Environnement Atmosphérique, d'Environnement Canada, prévoit la décentralisation prochaine des bureaux météorologiques. Cette décentralisation réduira la masse critique de météorologistes en un endroit donné et rendra probablement encore plus rare l'expertise disponible.

Compte tenu des tendances existantes, les services que pourraient rendre les systèmes experts en météorologie opérationnelle apparaissent donc intéressants. Plusieurs groupes de recherche dans le monde entier ont déjà commencé à s'intéresser à ce problème. Dans la prochaine section nous ferons un bref compte-rendu de l'état de quelques systèmes experts existants en météorologie.

## 1.3 Présentation de quelques systèmes experts appliqués à la météorologie

L'apparition des premiers systèmes experts orientés vers la météorologie se situe entre 1982 et 1984. Les premiers systèmes experts furent développés en fonction du diagnostic d'éléments du temps. Le diagnostic consiste en une analyse d'une situation donnée pour identifier les causes des phénomènes.

**METEOR** représente le pionnier dans ce domaine et le premier rapporté dans une note technique. Il s'agit d'un système expert développé par l'université d'Alberta par R. Elio et J. de Haan (Alberta Research Council), se spécialisant dans le diagnostic de la convection profonde. Il utilise les méthodes statistiques et une base de connaissances afin de prévoir la grêle en Alberta. Les faits proviennent d'un modèle statistique de formation de grêle, de guides numériques, et d'observations de surface. La base de connaissances est élaborée à

partir de la connaissance d'un expert météorologiste ayant une expérience de plus de 20 ans en prévision, dont plus de 10 ans en prévision de temps violent[1].

Ce système peut interpréter les données dérivées des modèles et les observations de surface. Il peut décoder ces observations malgré la présence de remarques peu courantes utilisées par certains observateurs. La prévision se présente sous la forme d'une carte contenant des explications à propos de la sortie. L'évaluation de la performance de **METEOR** est encore limitée, durant l'été 1985 le système a prévu correctement une tempête de grêle majeure tandis qu'il en manquait une autre.

Le système **WX1** de S. Campbell et S. Olson (MIT) est consacré à la détection automatique de micro-bourrasques (de l'anglais *microbursts*) et des lignes de grain. Il utilise les sorties de radars Doppler et présente sur une carte les régions de micro-bourrasques et les lignes de grain. Si un élément d'identification est manquant, le système interroge de nouveau la banque de données du radar afin de trouver des indications sur la présence de cet élément. Le programme est rédigé en LISP et tourne à partir d'une station "Symbolics". Ce système n'est pas encore opérationnel en temps réel, mais une évaluation initiale a permis de noter une aptitude à détecter les micro-bourrasques et des lignes de grain.

**HAIL** de R. Brady et F. Merrem (NOAA- *National Oceanographic and Atmospheric Administration*) estime l'intensité de la grêle pour des tempêtes observées. Ce programme a été développé dans le cadre du programme PROFS (*Program for Regional Observing and Forecasting Services*). **HAIL** tire profit du talent des êtres humains en se fiant à un opérateur pour la reconnaissance de formes. Le système pose des questions à l'usager au sujet de la présence d'échos radar indiquant la présence possible de tempêtes de grêle.

Mentionnons aussi le système **WISE**, développé par le Service de l'environnement atmosphérique, d'Environnement Canada, qui se spécialise dans le diagnostic des vents pour plusieurs stations au Canada.

[1]Par temps violent on entend des phénomènes comme les tornades et les tempêtes de grêle.

Dans le domaine de la prévision des éléments du temps, **SCAPIN** figure parmi les premiers systèmes experts développés. **SCAPIN** fut développé en 1985-1986 par M. Pollard et B. Raoult de l'École nationale de la météorologie (ENM-France). Il s'agit d'une maquette de système expert permettant de reproduire le raisonnement d'un prévisionniste devant établir une prévision de 24 heures.

# Chapitre II

# Présentation du projet OASIS

## 2.1 Historique du projet OASIS

Tel que mentionné à section 1.3, le système expert **SCAPIN** figure parmi les premiers systèmes experts appliqués à la prévision du temps. La version 1.0 de **SCAPIN** fut développée dans le cadre d'un stage d'approfondissement d'élèves ingénieurs des travaux de la météorologie qui a eu lieu de fin novembre 1985 à fin mai 1986. Il s'agissait d'un projet d'une durée de six mois visant à démontrer la faisabilité d'un système expert de prévision générale en météorologie.

La seconde version de SCAPIN, la version 1.1, fut réalisée dans le cadre d'un échange franco-québecois, dont la durée s'est étendue de la mi-décembre 1986 à fin mai 1987. Le stage s'est déroulé à l'Université du Québec à Montréal (UQAM) en collaboration avec la section de formation professionnelle du Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada (SEA). L'équipe était constituée du Dr. Peter Zwack, professeur au département de physique de l'UQAM, de M. Gilles Babin, instructeur à la section de formation professionnelle du SEA, et de M. Hugo Vandeputte, stagiaire, qui représentait la contribution de la France au projet.

L'enthousiasme du Dr. Zwack à propos de SCAPIN a permis au projet de prendre rapidement de l'ampleur. A l'été 1987, les professeurs Evelyne Tropper et Monroe Newborn se sont intéressés au projet, de même que M. Richard Gilbert, président de la firme Météoglobe Canada.

A l'automne de 1987, le groupe a approché le Centre de recherche informatique de Montréal (CRIM) pour demander un support éventuel au projet. Le but visé était de soumettre, par le biais d'un projet conjoint CRIM/Météoglobe, une proposition spontanée au Ministère fédéral des Approvisionnements et services visant le financement d'un projet de trois ans pour le développement d'un système expert destiné à la production de prévisions de type FT.

Pour augmenter les chances d'acceptation du projet, le CRIM et Météoglobe ont décidé d'allouer des ressources humaines et matérielles pour le développement d'un prototype de prévision de nuages bas, dont la durée devait s'étaler sur cinq mois, du début janvier à la fin mai 1988. C'est à ce moment qu'est né le projet **OASIS**, et que l'auteur de ce document s'est joint à l'équipe de développement.

L'acronyme **OASIS** vient de l'image que l'équipe de développement s'est faite du prototype. Un oasis est un lieu paisible qui permet de soulager des êtres humains aux prises avec un environnement hostile. Dans le cadre de la météorologie opérationnelle, l'environnement hostile est l'ensemble des conditions qui stressent un météorologiste dans l'exercice de ses fonctions, soit la quantité énorme de données à assimiler et à interpréter dans un temps très restreint. **OASIS** représente le bon samaritain qui enlève le gros du fardeau au voyageur épuisé.

## 2.2 Equipe de développement

Le tableau 2.1 montre la liste des personnes qui ont participé au développement d'OASIS. La figure 2.1 montre l'organigramme du personnel, ainsi que les tâches assignées à chaque participant.

| Participant | Organisme |
|---|---|
| M. Yves Chartier | Université de Montréal/ Météoglobe Canada |
| M. André Cotnoir | UQAM/Environnement Canada |
| Mme Frances DeVerteuil | CRIM |
| M. Richard Gilbert | Météoglobe Canada |
| M. Jean Goulet | Université McGill |
| M. Marc-Eric Larocque | Université McGill |
| Mlle Asnat Macoosh | CRIM |
| Dr. Monroe Newborn | Université McGill |
| Mme Evelyne Tropper | UQAM |
| Dr. Peter Zwack | UQAM |

Tableau 2.1 Liste des personnes ayant participé au développement du prototype

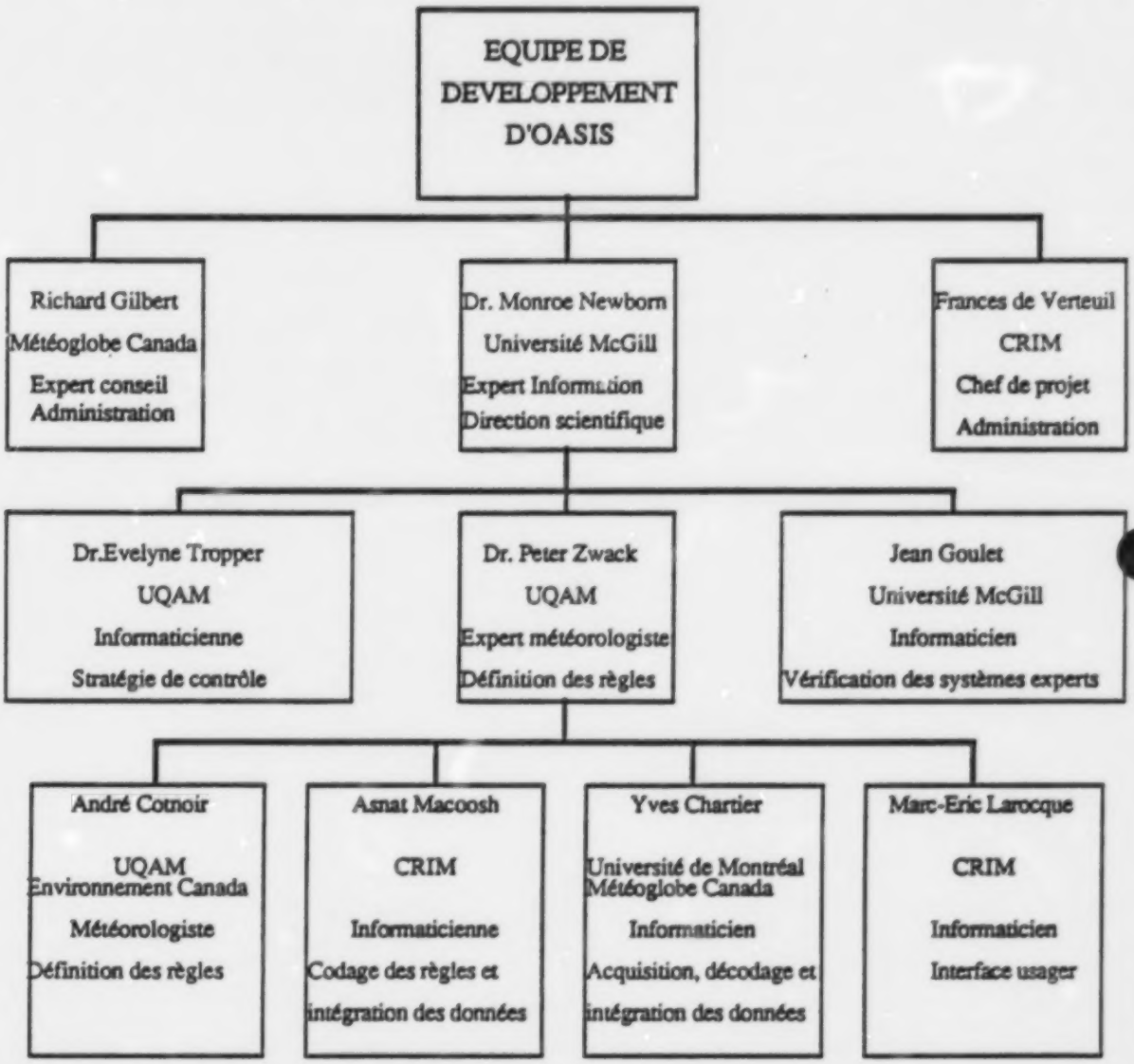



Figure 2.2 Organigramme du personnel ayant participé au développement d'OASIS

## 2.3 Tâches de l'auteur durant la réalisation du stage

Durant la réalisation de ce stage, les activités de l'auteur ont été les suivantes:

- Rédaction d'une étude sur l'intégration des données météorologiques dans OASIS. Ce document est considéré d'importance stratégique pour Météoglobe. Pour ces raisons, la direction de la compagnie a demandé que ce document ne fasse pas partie du présent rapport.

- Gestion du transfert de données entre les ordinateurs du CRIM et du Centre météorologique canadien.

- Conception et implantation de programmes pour extraire les données météorologiques des ordinateurs d'Environnement Canada

- Conception et implantation des programmes de transformation en schémas des rapports horaires et des sorties du modèle numérique EFR.

- Conception et implantation de programmes faisant la conversion des sorties de modèles de coordonnées sigma en coordonnées de pression.

# Chapitre III

# Représentation des données météorologiques

## 3.1 Introduction

Ce chapitre présente l'essentiel du travail accompli durant ce stage, soit la représentation en schémas de données météorologiques brutes. Ce chapitre est divisé en trois sections. La première section présente brièvement le concept de la représentation de connaissances en objets structurés (schémas). Les deux autres sections décrivent le processus de transformation en schémas des données météorologiques utilisées par le prototype, soit les rapports horaires et les sorties de modèles numériques.

## 3.2 Représentation de la connaissance par schémas

Il est courant en intelligence artificielle de représenter la connaissance sous forme d'objets structurés ou *schémas*. Un schéma pourrait se définir comme étant un objet caractérisé par un ensemble de propriétés ou attributs.

Les schémas peuvent être catégorisés selon différentes classes et faire partie d'une hiérarchie; cette propriété permet aux schémas se situant à un niveau inférieur d'une hiérarchie d'hériter des propriétés des niveaux supérieurs. Deux types de liens hiérarchiques sont particulièrement utilisés dans ce mode de représentation: les liens *est-un*[1] (de l'anglais *is-a* ) et *instance*. Ces liens sont uni-directionnels et orientés de bas en haut dans une hiérarchie.

Le lien *est-un* permet de relier entre elles différentes classes, et est orienté d'une sous-classe à une classe supérieure. Ces classes représentent des concepts généraux qui peuvent s'appliquer à un groupe d'individus. Le lien *instance* se retrouve toujours au bas d'une hiérarchie; il permet d'identifier de façon unique un objet individuel plutôt qu'un ensemble d'objets.

[1]On pourrait aussi traduire ce lien par *sorte-de* ou *type-de*.

Cet héritage de propriétés entre sous-classes et classes supérieures, et entre individus et sous-classes peut se représenter sous forme de réseaux sémantiques. L'exemple illustré à la figure 3.1, inspiré de [Charniak et McDermott, 87][1], illustre ce concept.

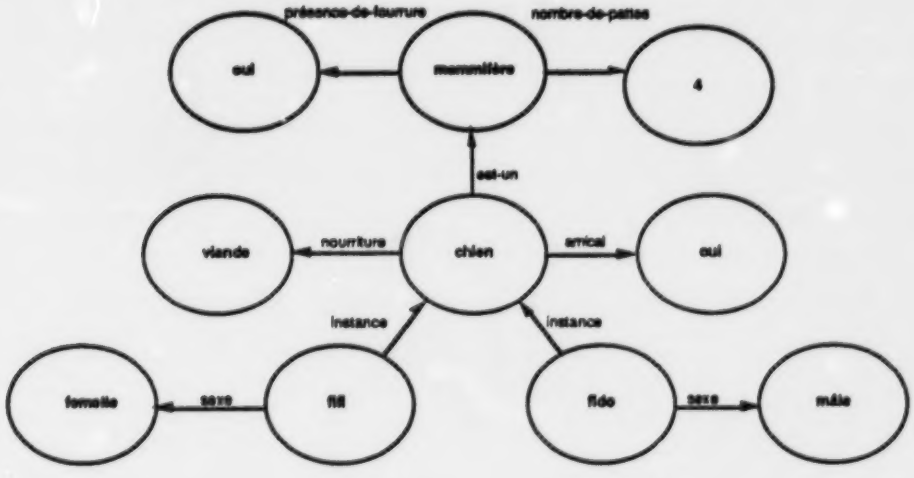



Figure 3.1 Exemple d'héritage hiérarchique de propriétés

Le diagramme de la figure 3.1 nous permet d'inférer que **Fifi** et **Fido** sont des instances de la classe **chien**, et qu'ils partagent les propriétés indiquées dans ce diagramme qui sont attribuables à cette classe, soit qu'ils sont amicaux et se nourrissent de viande. Le diagramme nous permet d'inférer aussi que, puisque les chiens sont une sous-classe de la classe **mammifère**, **Fifi** et **Fido** ont 4 pattes et sont des animaux à fourrure. Ce diagramme définit aussi des caractéristiques propres à **Fifi** et **Fido**, qui les distinguent des autres chiens, leur sexe par exemple.

Dans les prochaines sections, nous discuterons de l'application de ces concepts pour la représentation de données météorologiques.

[1] Charniak, McDermott; *Introduction to artificial intelligence*, p. 407.

## 3.3 Représentation des rapports horaires

### 3.3.1 Description

A chaque jour dans le monde près de 9 000 stations d'observation mesurent, à intervalles réguliers, plusieurs éléments du temps. Au Canada, on compte près de 300 stations d'observations opérées par des êtres humains et 40 stations automatiques.

Ces observations sont habituellement transmises sur télétype, sous la forme d'un rapport codé. Il existe différents types de rapports, les plus courants étant les rapports synoptiques et les rapports horaires. Ces rapports contiennent à toute fin pratique la même information; ce sont les codes utilisés pour rapporter les éléments du temps qui les différencient. Les rapports synoptiques sont destinés à être transmis à l'échelle de la planète, alors que les rapports horaires sont transmis seulement en Amérique du Nord.

Nous avons choisi d'utiliser les rapports horaires parce qu'ils sont transmis à toutes les heures, comparativement aux rapports synoptiques qui sont transmis aux six heures. Les rapports horaires nous permettent ainsi d'avoir un suivi du temps à une échelle plus fine que les rapports synoptiques.

#### 3.3.1.1 Distribution géographique

La plupart des stations d'observation se retrouvent dans les aéroports. Dans la région de Montréal, les stations de Dorval, de Saint-Hubert et de Mirabel en sont des exemples. On en retrouve quelques unes en des sites spécialement choisis, comme Sainte-Agathe ou Maniwaki. Les stations automatiques se retrouvent surtout en des sites éloignés, comme le grand Nord.

La figure 3.2 montre l'ensemble des stations (automatiques et manuelles) définies sur la grille d'OASIS[1]. Les stations sont indiquées par les points noirs. L'aéroport de Dorval est situé au centre de la grille.

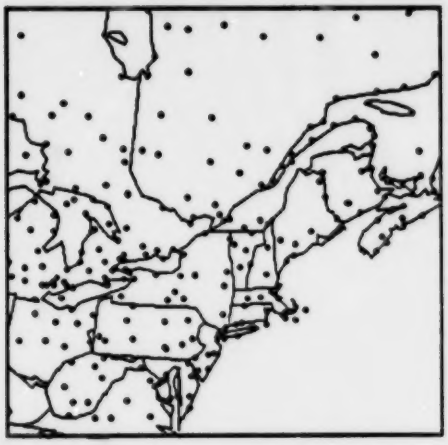


Figure 3.2 Réseau de stations synoptiques sur la grille d'OASIS

### 3.3.1.2 Distribution temporelle

La plupart des stations transmettent les rapports horaires à toutes les heures, sur le coup de l'heure, 24 heures par jour, 7 jours par semaine. Lorsqu'il y a mauvais temps et que les conditions sont très variables, des observations supplémentaires peuvent être émises, selon certaines règles définies.

[1]Le document présenté à l'annexe II, *Spécifications de la grille d'OASIS*, explique en détail comment les paramètres de cette grille ont été déterminés.

#### 3.3.1.3 Éléments météorologiques disponibles

Les rapports horaires contiennent une grande variété de paramètres météorologiques. Le ableau 3.1 montre la liste de ceux qui ont été retenus pour le prototype. Ces paramètres sont discutés en détail à la section 3.3.2.2.3 du présent chapitre.

- pression au niveau moyen de la mer
- température
- température du point de rosée
- vitesse et direction des vents
- visibilité horizontale
- type de nuages
- étendue des nuages
- hauteur des nuages
- opacité des nuages
- phénomènes atmosphériques (ex. précipitations)

Tableau 3.1 Liste des éléments météorologiques retenus pour le prototype

Dans les sections qui suivent nous nous intéresserons aux liens hiérarchiques et aux concepts de la section 3.2 qui pourraient s'appliquer aux rapports horaires et aux sorties de modèles numériques. Nous tenterons d'abord de définir les classes qui peuvent intervenir entre le bas et le sommet de la hiérarchie, pour ensuite décrire de façon précise la nature des attributs des schémas sélectionnés pour le prototype.

### 3.3.2 Modélisation conceptuelle

#### 3.3.2.1 Définition des classes

##### 3.3.2.1.1 Catégorisation selon le type de données

Au sommet de la hiérarchie nous pourrions définir la classe **source-de-données-météorologiques**, dont les stations qui émettent les rapports horaires font partie. Parmi

les autres sources de données météorologiques mentionnons les satellites, les radars, les pilotes et les modèles numériques. Cette catégorisation est illustrée schématiquement à la figure 3.3.

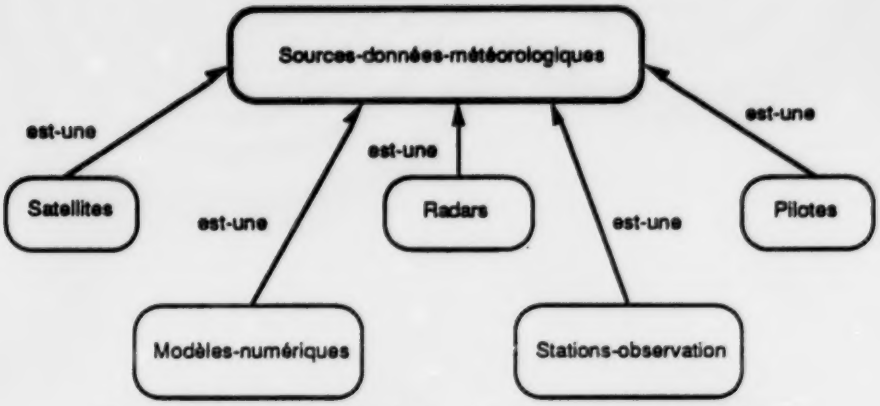



Figure 3.3 Catégorisation selon le type de données

#### 3.3.2.1.2 Catégorisation selon les pays

Les stations d'observation peuvent se diviser en plusieurs sous-classes. Une catégorisation qui vient naturellement est l'utilisation du pays d'origine. En effet, malgré certaines conventions internationales, les pays utilisent généralement des protocoles de mesure de données qui leur sont propres.

Par exemple, les tables utilisées pour extrapoler la pression au niveau de la mer diffèrent selon les pays. Les États-Unis rapportent la température en degrés Farenheit, alors qu'au Canada cette variable est rapportée en degrés Celsius. Les rapports horaires des États-Unis ne font pas mention du type de nuages observés, alors que les rapports canadiens le font. La sous-classe **station-observation-du-pays-A** peut donc être utile pour définir les unités de certaines variables, ou confirmer la présence ou l'absence de mesure certaines variables météorologiques.

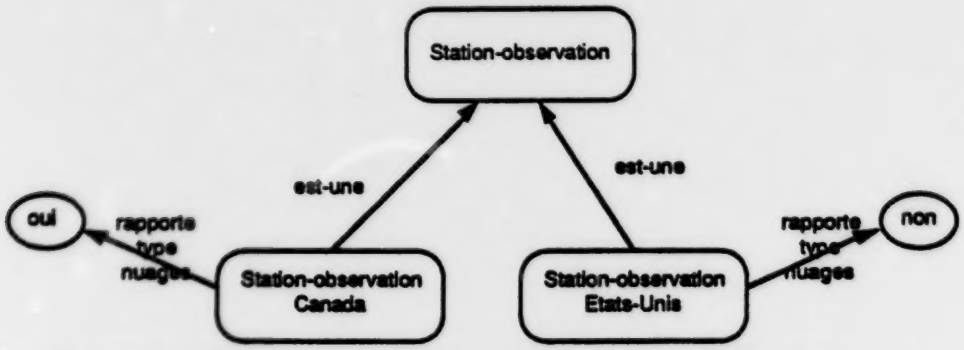



Figure 3.4 Catégorisation des rapports horaires selon les pays

Il serait possible de définir de multiples sous-classes en se basant sur la géographie politique. Par exemple, on pourrait définir la sous-classe **station-observation-Laurentides**, sous-classe de la classe **station-observation-Québec**, appartenant elle-même à la classe **station-observation-Canada**. La pertinence de cette catégorisation selon les régions serait peut-être discutable, l'atmosphère se souciant peu des frontières géo-politiques. Les problèmes causés par les pluies acides au Québec en sont un exemple.

### 3.3.2.1.3 Catégorisation selon les types de station

Dans chaque pays, les stations d'observation pourraient se diviser en deux classes: les stations automatiques et les stations manuelles (opérées par des êtres humains). En général les stations automatiques rapportent moins de données, et ces données sont moins fiables que celles venant des stations opérées par des êtres humains. Cette distinction entre les types de stations peut être suffisamment importante pour justifier la création d'une nouvelle sous-classe, soit les classes **station-automatique-du-pays-A** et **station-manuelle-du-pays-A**. La figure 3.5 illustre ce lien.

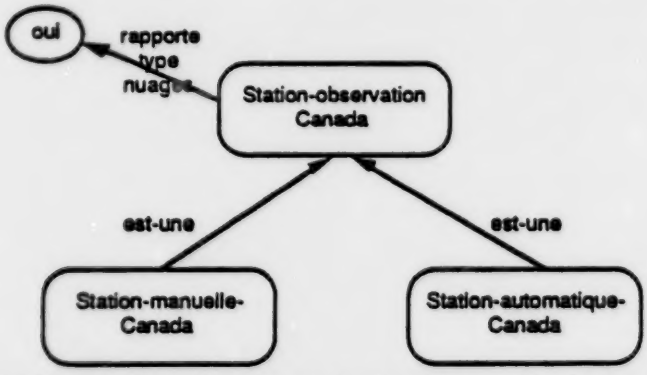



Figure 3.5 Catégorisation des rapports horaires selon le type de station

Les stations automatiques peuvent se présenter sous différentes modèles, les plus récentes étant généralement plus perfectionnées. On pourrait donc créer de multiples classes de stations automatiques.

Une fois ces distinctions faites, il n'est plus vraiment nécessaire de raffiner davantage cette catégorisation, puisque les stations définies dans chaque catégorie rapportent leurs observations suivant des procédures identiques.

#### 3.3.2.1.4 Catégorisation selon les stations individuelles

Nous pourrions maintenant définir une classe distincte pour chacune des stations appartenant à une catégorie donnée. Cette classe représenterait l'ensemble des produits émis par une station.

Nous pourrions par exemple définir une sous-classe **STATION**, faisant partie de la classe **station-manuelle-du-pays-A**, qui regrouperait l'ensemble des messages émis par une station météorologique. Le nom du schéma serait le code de trois lettres représentant l'aéroport. Nous avons préféré représenter les stations par ce code plutôt que par leur toponyme courant pour les raisons suivantes. Les usagers potentiels d'OASIS, soit les météorologistes professionnels, font habituellement référence aux stations d'observations en utilisant ce code. L'utilisation de ce code garantit aussi que chaque aéroport sera défini de façon unique dans la base de connaissances (par exemple les stations américaines ayant pour code ART et ATY ont tous deux le nom de Watertown, mais désignent en fait des stations différentes).

#### 3.3.2.1.5 Catégorisation selon les produits émis

Les stations d'observation émettent généralement plusieurs types de messages, les principaux étant des rapports horaires, des rapports synoptiques et des rapports climatologiques. Il apparaît naturel de définir une classe **RAPPORT-HORAIRE-STATION** pour chacun de types de rapports. Ce lien est illustré à la figure 3.6.

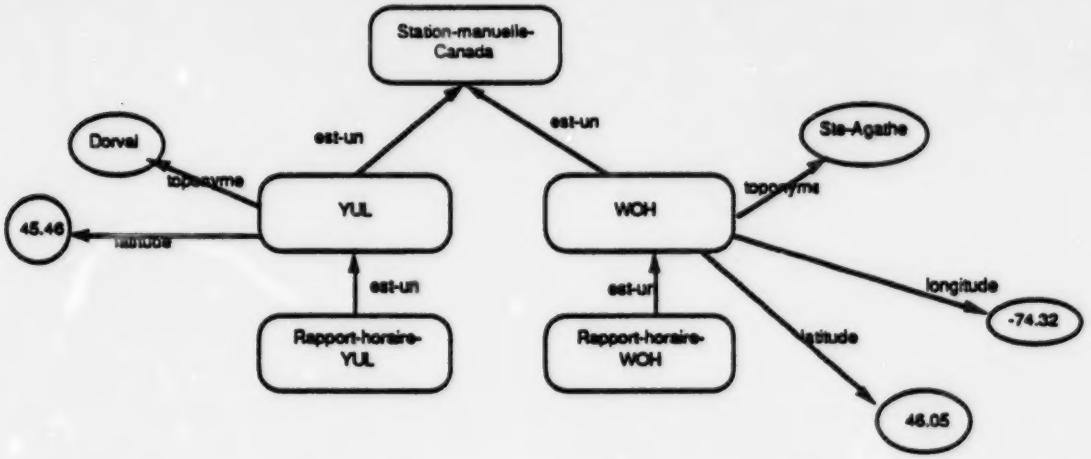



Figure 3.6 Catégorisation des rapports horaires selon les stations

### 3.3.2.1.6 Catégorisation selon les rapport horaires individuels

Nous pourrions définir maintenant les rapports horaires valides pour un temps t comme étant des **instances** de rapports émis par une station. En effet, un rapport horaire contient des valeurs déterministes de différents éléments du temps et forme un tout que l'on peut facilement identifier de façon concrète. Par exemple, on peut obtenir une valeur pour la température rapportée à l'aéroport de Dorval le 28 mai 1988 à 17h00 TUC (Temps Universel coordonné. Nous pouvons être assurés que cette observation est unique dans le temps et dans l'espace, puisque le temps s'écoule de façon non cyclique et qu'il n'existe pas dans le monde deux aéroports de Dorval, avec les mêmes coordonnées géographiques.

Cet écoulement non cyclique du temps permet de donner un nom unique à une observation météorologique dans le temps et dans l'espace. On peut par exemple donner un nom unique à une instance de rapport horaire, en utilisant un symbole de type CODE-AAMMJJHHHH, où

- CODE est le code de trois lettres représentant la station
- AA représente l'année (ex: 88 pour l'année 1988)
- MM représente le mois de l'année (ex: 03 pour le mois de mars)
- JJ représente le jour du mois (ex: 14 pour le 14 du mois)
- HHHH représente l'heure du jour, en TUC (ex: 2254 pour 22h54).

Cette convention sur les noms des instances a de plus l'avantage de permettre à un usager l'identification rapide des instances de rapports horaires disponibles dans la base de connaissances.

Si on faisait un lien avec l'exemple de la figure 3.1, la classe **rapport-horaire-YUL** serait l'équivalent de la classe **chien**, et l'instance **YUL-8805281700** l'équivalent de l'instance **Fido**. Comme l'instance **Fido** possède des attributs qui le rendent unique par rapport aux autres chiens, l'instance **YUL-8805281700** possède elle aussi des attributs qui la rendent est unique par rapport aux autres observations. Même si tous les éléments météorologiques affichaient des valeurs identiques pour un ensemble de rapports, les paramètres temporels permettraient de définir quand même de façon unique chacun des rapports horaires.

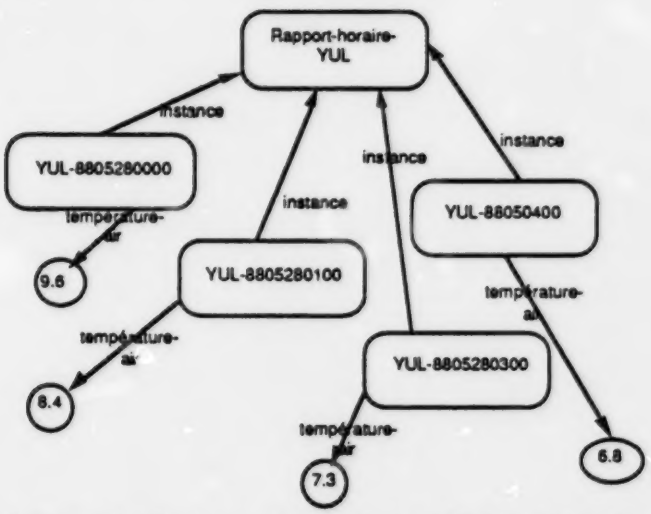



Figure 3.7 Instances de rapports horaires définies selon le temps des observations

Le diagramme de la figure 3.8 montre le réseau sémantique obtenu en joignant l'ensemble des classes décrites précédemment.

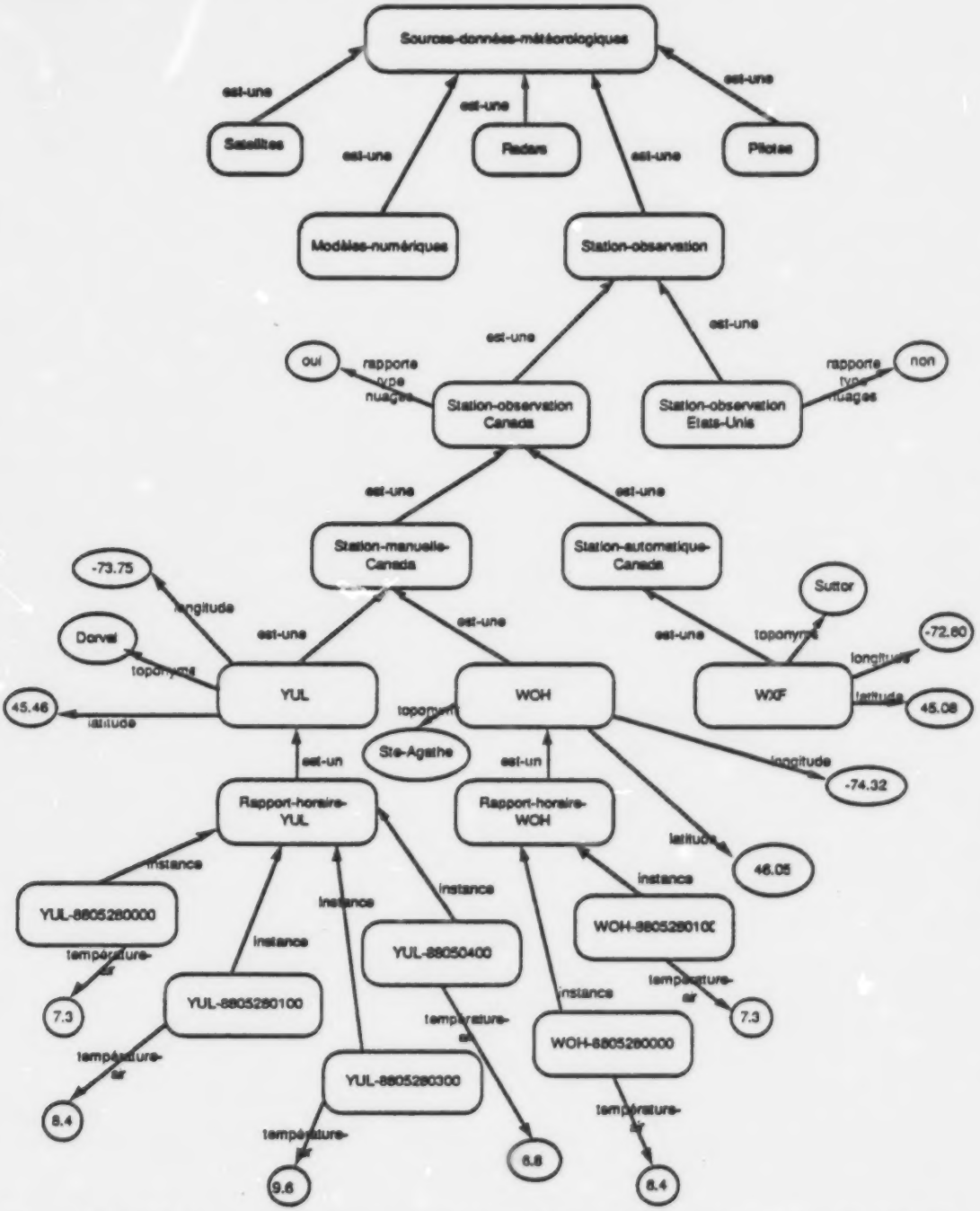



Figure 3.8 Réseau sémantique représentant les différentes classes de rapports horaires

#### 3.3.2.1.7 Classes implantées dans le prototype

La hiérarchie des schémas implantés dans le prototype a été quelque peu restreinte. En fait cinq niveaux du réseau sémantique de la figure 3.8 ont été implantés. Ceci s'explique pour deux raisons. D'abord, les rapports horaires utilisés par le prototype nous ont été livrés dans un format qui rendait les rapports canadiens et américains semblables; il n'y avait donc plus besoin de faire de distinctions entre les rapports des deux pays. Ensuite, les rapports des stations automatiques n'ont pas été considérés, la plupart de ces stations ne rapportant pas d'observations concernant l'état du ciel.

Les classes qui ont été conservées sont les suivantes:

- la classe SOURCE-DONNÉES-MÉTÉOROLOGIQUES, qui regroupe l'ensemble des données météorologiques utilisées par le prototype,
- la classe STATION-OBSERVATION, qui regroupe l'ensemble des stations d'observation définies sur la grille d'OASIS,
- la classe STATION, qui regroupe les types de messages émis par une station donnée,
- la classe RAPPORT-HORAIRE-STATION, qui regroupe l'ensemble des rapports horaires émis par une station donnée,
- les instances de la classe RAPPORT-HORAIRE-STATION, dont chacune représente une observation météorologique.

### 3.3.2.2 Définition des attributs

Dans la présente section nous décrirons les attributs des schémas représentant les rapports horaires, tel qu'implantés dans le prototype.

Pour représenter graphiquement les schémas, nous allons introduire maintenant une présentation différente de celle utilisée pour les réseaux sémantiques. Cette présentation se justifie par une économie d'espace, étant donné le grand nombre d'attributs à présenter. Dans ce type de présentation, les symboles doivent être interprétés de la façon indiquée par la figure.

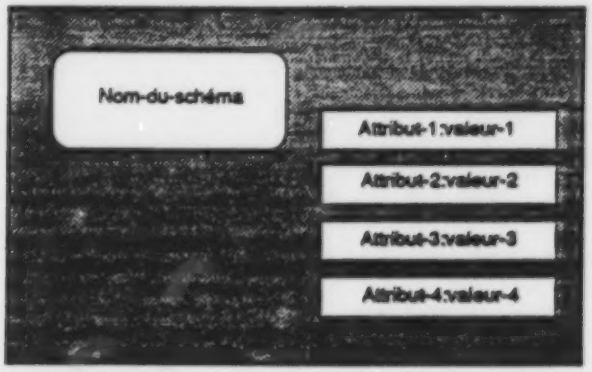



Figure 3.9 Représentation graphique d'un schéma

#### 3.3.2.2.1 Attributs de la classe SOURCE-DONNEES-METEOROLOGIQUES

Cette classe se trouve au sommet de la hiérarchie et ne contient pas d'attributs. Elle permet en fait de regrouper les différentes sources de données météorologiques définies dans le prototype. La structure de ce schéma est illustrée à la figure 3.10.

Figure 3.10 Illustration du schéma SOURCE-DONNÉES-MÉTÉOROLOGIQUES

#### 3.3.2.2.2 Attributs de la classe STATION-OBSERVATION

Cette classe ne contient qu'un seul attribut, **est-un(e)**, qui permet de faire le lien avec la classe SOURCE-DONNÉES-MÉTÉOROLOGIQUES et permet de regrouper les différentes stations météorologiques définies dans le prototype. La structure de ce schéma est illustrée à la figure 3.11.

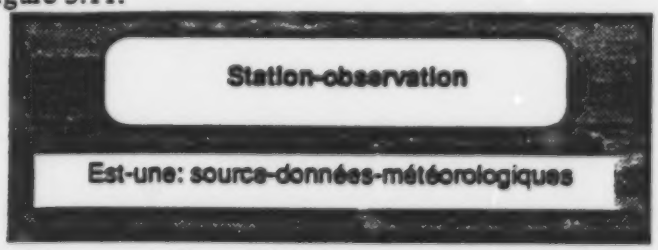



Figure 3.11 Illustration du schéma STATION-OBSERVATION

#### 3.3.2.2.3 Attributs de la classe STATION

La attributs de la classe **STATION** permettent de préciser la position géographique d'une station d'observation sur la terre, attributs qui l'identifient de façon unique. Ces attributs sont: la latitude, la longitude, l'élévation, le toponyme de la station et les coordonnées x et y de la station sur la grille d'OASIS. Voici une description plus détaillée de ces attributs, qui sont illustrés à la figure 3.12. .

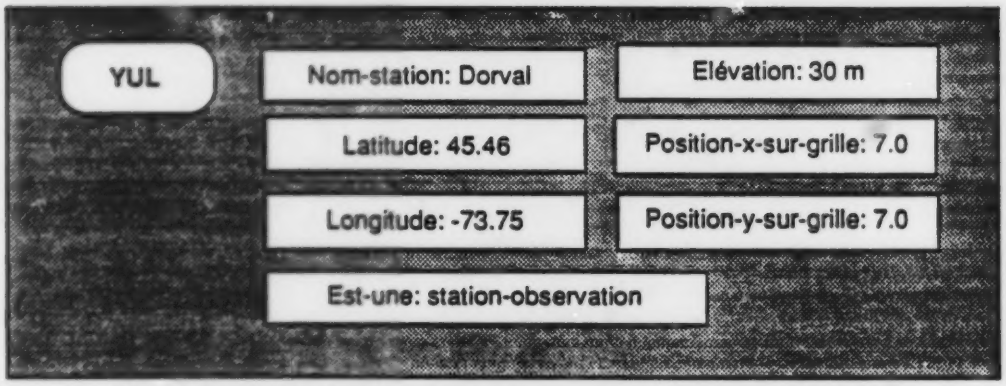



Figure 3.12 Illustration de la classe de schémas STATION

**Station:**
Ce paramètre, qui est le nom du schéma, représente le code utilisé couramment par le personnel naviguant. Ce code est composé de trois lettres, commençant presque toujours par un "Y" ou un "W" au Canada. En général, la lettre "Y" identifie les aéroports de Transport Canada, la lettre "W" des stations d'observation opérées par Environnement Canada, situées ailleurs que dans des aéroports. Aux États-Unis, ce code est de format plus libre; on essaie généralement de rendre le mnémonique du code représentatif du nom de l'aéroport (par exemple JFK pour l'aéroport John F. Kennedy). Au Canada, ce lien de ressemblance est la plupart du temps inexistant (par exemple, YUL pour Dorval, WOH pour Sainte-Agathe).

**Nom-station:**
C'est le toponyme courant de la station. Par exemple, l'attribut **nom-station** du schéma **YUL** prend la valeur **Dorval**.

**Latitude:**
La latitude du lieu est exprimée en degrés, à une précision du l'ordre du centième de degré, ce qui représente une précision réelle de l'ordre de ±1.1 km. La latitude est positive dans l'hémisphère nord et négative dans l'hémisphère sud.

**Longitude:**
La longitude du lieu est exprimée à une précision semblable à celle de la latitude, soit de l'ordre du centième de degré, ce qui représente une précision réelle de l'ordre de ±0.78 km à la latitude de Montréal. La longitude est positive à l'est du méridien de Greenwich jusqu'à la ligne de changement de date, qui correspond à la longitude +180, et négative à l'ouest du méridien de Greenwich jusqu'à la ligne du changement de date. En Amérique du Nord, les longitudes sont toujours négatives.

**Élévation:**
Ce paramètre correspond à l'élévation de la station au-dessus du niveau de la mer, et est mesuré en mètres.

**Position-x-sur-grille:**
Ce paramètre indique la position X de la station sur la grille d'OASIS.

**Position-y-sur-grille:**
Ce paramètre indique la position X de la station sur la grille d'OASIS.

#### 3.3.2.2.4 Attributs de la classe RAPPORT-HORAIRE-STATION

La classe **RAPPORT-HORAIRE-STATION** permet de regrouper l'ensemble des instances de rapports horaires. Elle possède un seul attribut, **est-un** (le terme "est-un-produit-de" étant sous-entendu), qui permet de lier ce schéma à la classe **STATION**. La représentation de cette classe de schémas est illustrée à la figure 3.13.

Figure 3.13 Illustration de la classe de schémas RAPPORT-HORAIRE-STATION

### 3.3.2.2.5 Attributs des instances de la classe RAPPORT-HORAIRE-STATION

Les attributs des instances de la classe **RAPPORT-HORAIRE-STATION** sont composés d'estimés et de mesures de différentes variables météorologiques. Certains attributs n'ont qu'une seule valeur (par exemple la pression et la température), alors que d'autres peuvent en avoir plusieurs (par exemple plusieurs couches de nuages peuvent être rapportées; on peut aussi observer différents types de précipitation simultanément). Une représentation graphique de ce schéma est illustrée à la figure 3.14. Ce schéma représente le rapport horaire émis par Dorval, pour le 28 mai 1988 à 21h00 TUC.

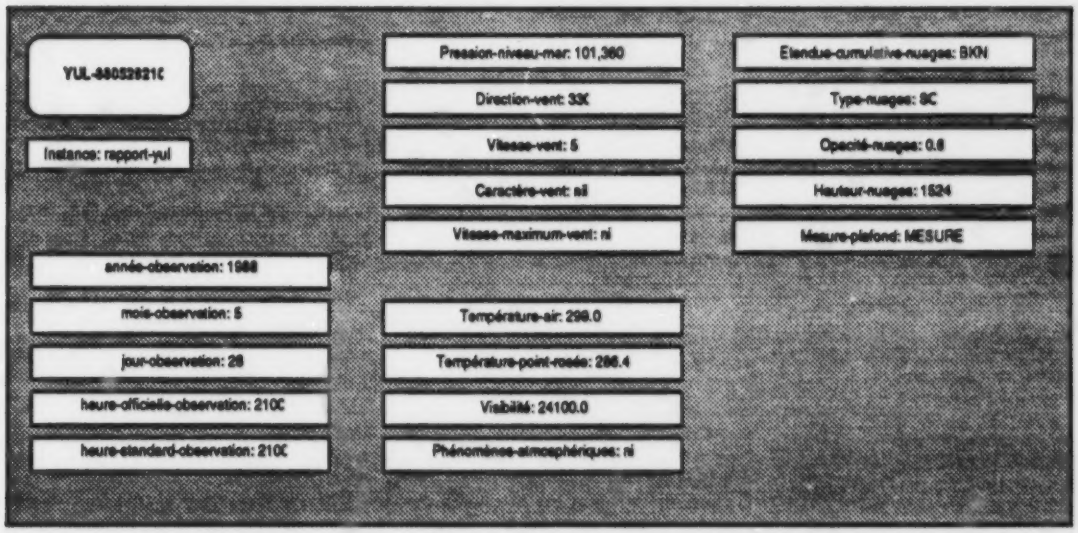



Figure 3.14 Illustration d'une instance de la classe de schémas RAPPORT-HORAIRE-STATION

Voici une description de chacun des paramètres météorologiques retenus pour le prototype. D'autres paramètres auraient pu s'ajouter à cette liste. Suite à une discussion avec le Dr. Zwack, nous n'avons retenu que ceux dont l'influence sur les nuages bas est la plus tangible. Parmi les paramètres non retenus mentionnons le calage de l'altimètre, la hauteur des précipitations et la quantité de neige au sol. Nous nous sommes efforcés de rendre les unités des variables météorologiques conformes au système international (SI). L'unité SI apparaît pour chaque paramètre qui peut se mesurer à l'aide d'instruments.

**Année-observation:**
C'est l'année où l'observation a été prise (ex. 1988).

**Mois-observation:**
C'est le mois où l'observation a été prise. Le mois est exprimé comme un nombre allant de 1 à 12, représentant dans l'ordre habituel les mois de janvier à décembre.

**Jour-observation:**
C'est le quantième du mois où l'observation a été prise. Le jour peut aller de 1 à 31, selon le mois et les années.

**Heure-officielle-observation et heure-standard-observation:**
L'heure officielle d'observation correspond à l'heure où la pression a été lue sur le baromètre, lors d'une observation régulière, ou à l'heure où un phénomène particulier a été identifié lors d'une observation spéciale.

L'heure standard d'observation est utilisée pour faciliter l'échange international des données; elle peut être légèrement différente de l'heure exacte de l'observation. Pour les rapports horaires canadiens réguliers, la valeur de l'heure officielle d'observation est la même que l'heure standard d'observation. Aux États-Unis, l'heure officielle d'observation peut varier de 5 à 15 minutes avant le coup de l'heure, mais l'ensemble de l'observation doit être interprétée comme étant valide à l'heure standard d'observation. Par exemple, l'heure de validité d'une observation prise à 22h45 TUC doit être interprétée comme étant valide à 23h00 TUC. Pour des messages spéciaux, dans les deux pays, l'heure standard représente la fonction plancher de l'heure exacte de l'observation. Par exemple, l'heure standard d'une observation prise à 23h40 est 23h00.

Pour les deux paramètres, l'heure est toujours exprimée en temps universel et apparaît sous le format HHMM. Par exemple, 21h00 est représenté comme étant 2100.

**Pression-niveau-mer:**
La pression au niveau moyen de la mer est une mesure normalisée de la pression atmosphérique enregistrée à la station. Ce paramètre est normalisé en fonction de la hauteur de la station, de la pression réelle instantanée et de la température de l'air enregistrée depuis les 12 dernières heures. Cette correction facilite l'analyse à grande échelle des données, puisque toutes les stations sont ramenées à une même hauteur[1]. Cependant, dans les régions montagneuses, le niveau moyen de la mer peut se situer jusqu'à 3 km sous la surface du sol, ce qui fait que la distance d'extrapolation peut être très grande. De plus, les pays n'emploient pas tous le même protocole pour calculer les facteurs de réduction, ce qui peut amener des inconsistances lors de l'analyse de ce champ à grande échelle. Dans OASIS, ce champ est exprimé en pascals.

**Direction-vent:**
C'est la direction d'où souffle le vent, moyennée sur une minute, telle que mesurée par un anémomètre situé à 5 mètres au-dessus du sol. L'angle 0° est aligné selon le nord géographique. Selon cette référence, un vent du nord souffle de l'angle 0°, un vent d'est, de 90°, un vent du sud, de 180° et un vent d'ouest de 270°. Cette variable est exprimée en degrés angulaires.

**Vitesse-vent:**
C'est la vitesse à laquelle souffle le vent, moyennée sur une minute, telle que mesurée par un anémomètre. Cette variable est exprimée en mètres par seconde (m/s).

**Caractère-vent:**
C'est un symbole indiquant si les variations du vent rencontrent les critères de rafales ou de grains. Ce symbole peut prendre deux valeurs: "G" pour les rafales (de l'anglais *gust*), ou "Q" pour les grains (de l'anglais *squall*).

Les rafales sont rapportées lorsque:

- le vent connaît des hausses rapides et de brève durée

[1]La figure 3.25 montre l'effet de cette réduction sur un champ de pression analysé à grande échelle.

- la vitesse du vent varie de 15 km/hr (10 noeuds) ou plus entre les pointes et les accalmies.

Les grains sont rapportés lorsque la vitesse du vent:

- augmente d'au moins 25 km/hr (15 noeuds)
- atteint au moins 35 km/hr (20 noeuds)
- se maintient aux niveaux mentionnés durant au moins 1 minute
- diminue ensuite.

**Vitesse-vent-maximum:**
Ce paramètre indique la vitesse maximum du vent lorsqu'il y a occurrence de rafales ou de grains. Comme pour la vitesse du vent, ce paramètre est rapporté en m/s.

**Température-air:**
C'est la température de l'air, en degrés Kelvin.

**Température-point-de-rosée:**
La température du point de rosée indique le degré d'humidité de l'air. Elle indique à quelle température l'air deviendrait saturé si on le refroidissait à pression constante. A l'aide d'équations, on peut relier ce terme à la quantité de vapeur d'eau dans l'air et à l'humidité relative. Comme pour la température de l'air, ce paramètre est rapporté en degrés Kelvin.

**Visibilité:**
Ce paramètre correspond à la plus grande distance à laquelle un objet de dimension convenable peut être vu et identifié, à une hauteur d'environ 2 mètres au dessus du sol. Dans OASIS, la visibilité est rapportée en mètres.

**Phénomènes-atmosphériques:**
Les phénomènes atmosphériques sont les manifestations courantes des éléments du temps comme la pluie, la grêle, les orages, etc. Plusieurs éléments peuvent être observés simultanément. Par exemple, il est possible d'observer, en un endroit donné, l'occurrence simultanée de pluie, de neige et de brouillard.

Les tableaux 3.2 et 3.3 montrent les divers phénomènes atmosphériques répertoriés dans le guide de l'usager du programme GETDATA. GETDATA est un logiciel développé par le Centre météorologique Canadien, à Dorval, qui décode les rapports horaires bruts et permet

leur consultation dans une base de données. Chaque symbole est représenté par sa définition française, suivi du code utilisé dans les rapports horaires pour le définir, et par sa définition anglaise qui montre l'origine de l'abréviation.

| | | |
|---|---|---|
| Bruine | L | drizzLe |
| Bruine verglaçante | ZL | freeZing drizzLe |
| Cristaux de glace | IC | Ice Crystals |
| Grésil | IP | Ice Pellets |
| Grêle | A | hAil |
| Neige | S | Snow |
| Neige en grains | SG | Snow Grains |
| Neige roulée | SP | Snow Pellets |
| Pluie | R | Rain |
| Pluie verglaçante | ZR | freeZing Rain |

Tableau 3.2 Phénomènes atmosphériques reliés aux précipitations

Chaque mention de précipitation est accompagnée d'une intensité, qui est ajoutée comme suffixe au symbole. Ainsi, le suffixe "--" indiquera une intensité très légère de la précipitation, le suffixe "-" une intensité légère, l'absence de suffixe, une intensité modérée et le suffixe "+" une intensité forte. Par exemple, le symbole "R--" représente de la pluie très légère, le symbole "ZL-", de la bruine verglaçante légère et le symbole "S", de la neige modérée. De plus on ajoute le suffixe "W" (pour shoWer) pour indiquer que le caractère temporel des précipitations rencontre le critère d'averses (ex. RW--, SW-, IPW-) .

| | | |
|---|---|---|
| Brouillard | F | Fog |
| Brouillard glacé | IF | Ice Fog |
| Brume de poussière | D | Dust |
| Brume sèche | H | Haze |
| Fumée | K | SmoKe |
| Orage | T | Thunder |
| Poudrerie | B S | Blowing Snow |
| Poussière | B D | Blowing Dust |
| Sable | B N | Blowing saNd |
| Entonnoir nuageux | FUNNEL CLOUD | |
| Tornade | TORNADO | |
| Trombe marine | WATERSPOUT | |

Tableau 3.3 Phénomènes atmosphériques non reliés aux précipitations

**Hauteur-nuages:**

C'est la hauteur des nuages au-dessus du sol, telle que mesurée ou estimée par l'observateur. Cette hauteur est exprimée en mètres. Dans une observation, on retrouve autant d'estimations de hauteurs de nuages qu'il y a de couches de nuages visuellement identifiables.

**Étendue-cumulative-nuages:**

L'étendue cumulative des nuages est la fraction du ciel visiblement couverte par une ou plusieurs couches de nuages en altitude. On associe une étendue de nuages à chaque occurrence de hauteur de nuages rapportée. Cette étendue peut apparaître sous la forme de cinq symboles:

- SCT (éparse, de l'anglais *scattered*), lorsque la couche et les couches inférieures couvrent 5/10 du ciel ou moins,
- BKN (fragmentée, de l'anglais *broken*) lorsque la couche et les couches inférieures couvrent entre 6/10 et 9/10 du ciel,
- OVC (totale, de l'anglais *overcast*) lorsque la couche et les couches inférieures couvrent 10/10 du ciel,
- -X (partiellement-obscurcie), lorsque le ciel est partiellement masqué par un phénomène se produisant près du sol (ex. brume, poudrerie),
- X (totalement-obscurcie), lorsque le ciel est totalement masqué par un phénomène près du sol ou en altitude (brouillard, précipitations intenses).

**Type-nuages:**

C'est un symbole qui représente le type de nuages observés (ex. strato-cumulus, nimbo-stratus). Comme pour l'étendue cumulative, on retrouve un type de nuages associé à chaque occurrence de hauteur de nuages observée. Ce paramètre n'est rapporté qu'au Canada seulement. Le tableau 3.4 donne la liste des types de nuages répertoriés selon le guide de l'usager du programme GETDATA, suivant le code représentant le nuage dans les rapports et leur équivalent français.

**Opacité-nuages:**

L'opacité d'une couche nuageuse est la partie du ciel qui est entièrement masquée par cette couche. L'opacité se mesure en dixièmes du ciel. Comme pour la couverture cumulative, on définit l'opacité d'une couche de nuages pour chaque occurrence de hauteur de nuages rapportée. Ce paramètre n'est rapporté qu'au Canada seulement.

| | |
|---|---|
| AC | Alto-cumulus |
| ACC | Alto-cumulus castellanus |
| AS | Alto-stratus |
| CB | Cumulo-nimbus |
| CC | Cirro-cumulus |
| CF | Cumulus-fractus |
| CI | Cirrus |
| CS | Cirro-stratus |
| CU | Cumulus |
| NB | Nimbo-stratus |
| SC | Strato-cumulus |
| SF | Stratus-fractus |
| ST | Stratus |
| TCU | Cumulus bourgeonnant |

Tableau 3.4 Types de nuages rapportés dans les rapports horaires canadiens

**Mesure-plafond:**

Ce paramètre est un symbole qui indique la méthode utilisée pour mesurer le plafond nuageux. On définit un plafond nuageux quand l'étendue cumulative des nuages couvre plus de 6/10 du ciel. Le tableau 3.5 montre la liste des méthodes répertoriées dans le guide de l'usager du programme GETDATA, suivant le code représentant la méthode. Selon la méthode il est possible d'associer un certain degré de précision sur la valeur de l'estimation. La précision de ces plafonds varie selon la façon dont ils ont été mesurés et la hauteur des nuages. Les mesures les plus précises sont celles ayant comme préfixe A, B et M, puisqu'elles sont basées sur des relevés d'instruments. Les préfixes de type E indiquent que la hauteur des nuages a été estimée sans instruments; l'incertitude sur ces mesures y est donc plus grande.

| | |
|---|---|
| **A** | Avion (mesuré par un pilote) |
| **B** | Ballon (mesuré avec un ballon) |
| **E** | Estimé (sans instruments) |
| **M** | Mesuré en utilisant un projecteur et un rapporteur d'angles |
| **P** | Précipitation (rapporté lorsque la précipitation ou le brouillard est assez intense pour masquer les nuages. Ce paramètre correspond alors à une visibilité verticale) |
| **W** | Plafond indéterminé. Ce message est souvent transmis par brouillard intense. |

Tableau 3.5 Liste des méthodes utilisées pour déterminer le plafond

L'ensemble de la hiérarchie formée par ces différents schémas est illustré à la figure 3.15. Cet exemple date du 28 mai 1988, à 21h00 TUC.

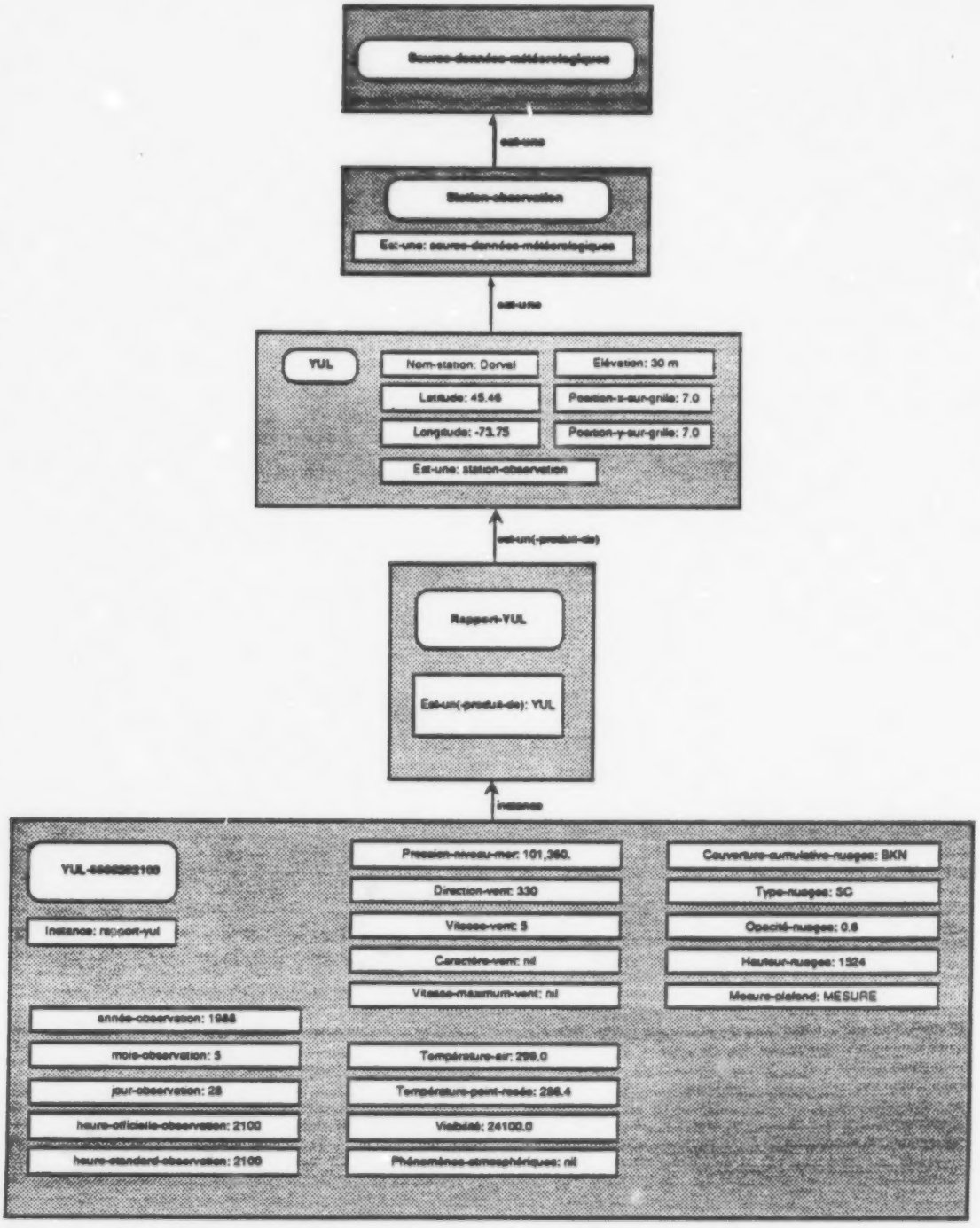



Figure 3.15 Illustration de l'organisation hiérarchique des schémas de rapports horaires implantés dans le prototype

### 3.3.3 Transformation des rapports horaires bruts en schémas

Avant de discuter des étapes de transformation des données brutes en schémas, il peut être utile de décrire le format dans lequel ces données sont disponibles.

#### 3.3.3.1 Format des rapports horaires bruts

Les rapports météorologiques utilisés par OASIS ont été préalablement décodés par le logiciel GETDATA. Ce logiciel offre l'avantage de standardiser le format et les unités des observations, indépendamment de leur provenance. Ceci a facilité l'implantation de programmes de décodage. Mentionnons que le développement de GETDATA a demandé plusieurs années-personnes de travail.

Voici un exemple des sorties de ce programme, qui représente un rapport d'observation météorologique pour Montréal. Ce rapport date du 28 mai 1988 à 21h00 TUC (17:00 heure de Montréal).

```
REPORT IDENT : YUL       LAT :  45.47N    LON :  73.75W
DATE TIME    : 282100(2100)OBS-TYPE : MANSA        ELEV:   30M
PPP      1013.6  DD        330  FF          5  TT       26.0
TDTD       13.4  A (TNDCY)   6  PPP(TNDCY)  0.3  VV       24.1
N           4  C           8  OP          6  H        1524
CEILING    1524  CEILTYPE    3  ALT       29.93  OTOT      6
NTOT        6
```

Figure 3.16 Exemple de rapport horaire non décodé

Les éléments du message sont constitués de paramètres géographiques, de mesures ou d'estimés de différentes variables météorologiques. Ces éléments viennent tous par paires, chaque paire étant constituée d'un symbole et d'une valeur. Le symbole est un code identifiant la variable ou le paramètre estimé. La valeur peut apparaître sous la forme d'une valeur numérique (comme la température), ou d'un code spécifique pour représenter, par exemple, un type de phénomène atmosphérique.

Le tableau 3.6 montre la liste des éléments retenus pour le prototype, ainsi que les codes utilisés pour les représenter.

| Paramètre | Code utilisé par GETDATA | Type de la valeur associée | Unités de la variable |
|---|---|---|---|
| instance | REPORT IDENT | symbole | |
| latitude | LAT | réel | degrés |
| longitude | LON | réel | degrés |
| heure-standard-observation | DATE TIME | entiers | JJHHMM[1] |
| heure-officielle-observation | DATE TIME | entiers | JJHHMM |
| élévation | ELEV | entier | m |
| pression-niveau-mer | PPP | réel | millibars |
| direction-vent | DD | entier | degrés |
| vitesse-vent | FF | entier | m/s |
| température-air | TT | réel | ℃ |
| température-point-rosée | TDTD | réel | ℃ |
| visibilité | VV | réel | $10^2$m |
| couverture-cumulative-nuages | N | symbole | |
| type-nuages | C | symbole | |
| opacité-nuages | OP | symbole | |
| hauteur-nuages | H | entier | m |
| mesure-plafond | CEILTYPE | symbole | |
| phénomènes-atmosphériques | WX | symbole | |

Tableau 3.6 Liste des codes utilisés pour l'identification des attributs

### 3.3.3.2 Vue d'ensemble des opérations de décodage

La transformation des observations brutes en schémas se fait par le biais de programmes développés en LISP par l'auteur. Ces programmes vont lire des rapports décodés par le programme GETDATA dans des fichiers de type texte, puis après quelques

[1]JJHHMM: Jour- heure- minutes. Un exemple, le 28 du mois à 20 heures 15 serait codé 282015.

transformations, les archivent sous forme de schémas. Ces schémas peuvent alors être utilisés directement par le prototype. Ce processus de transformation est illustré la la figure 3.17. Les prochaines qui suivent donnent des explications plus détaillées de chacune de ces opérations.

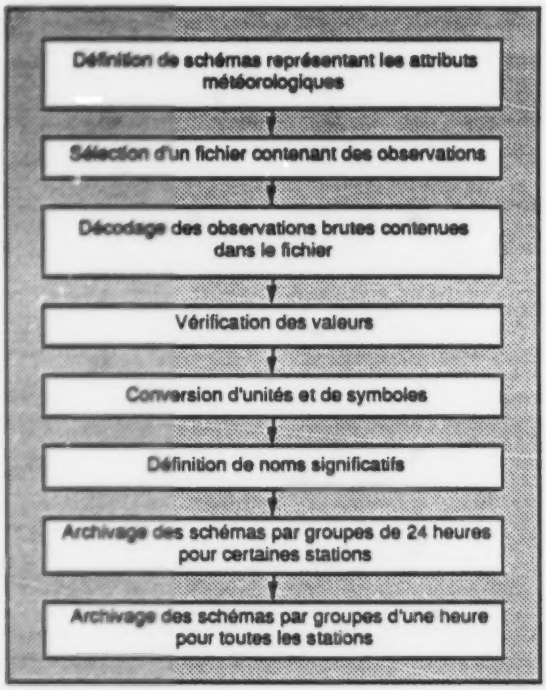



Figure 3.17 Illustration du processus de transformation des données brutes en schémas

### 3.3.3.3 Définition de schémas représentant les attributs météorologiques

Cette opération vise à définir dans la base de connaissance des schémas qui permettent l'identification, dans les rapports horaires bruts, des attributs météorologiques et la conversion des valeurs brutes dans les unités d'OASIS.

#### 3.3.3.3.1 Schémas utilisés pour l'identification des paramètres

La figure 3.18 illustre la structure de ce type de schéma. Le nom du schéma représente le code utilisé dans le programme GETDATA pour identifier l'attribut météorologique désiré. Ce schéma possède deux attributs: **fonction-lecture** et **attribut-associé**. L'attribut

**fonction-lecture** définit les opérations nécessaires pour assigner une valeur à un attribut donné. En LISP il est possible de considérer dans un fichier toute chaîne de caractères définie entre des espaces, des retours de chariot ou des parenthèses comme un objet distinct. Comme certains attributs sont composés de plus d'un mot, il donc connaître combien d'objets (donc de mots) doivent être lus pour atteindre la valeur désirée. L'attribut **attribut-associé** permet de définir la destination de la valeur lue dans le fichier, soit le nom d'un attribut du schéma de rapport horaire couramment en cours d'initialisation.

Dans l'exemple de la figure 3.18, l'attribut **fonction-lecture** du schéma **TT** a la valeur "lire-un-objet", correspondant au nom d'une fonction qui retourne la valeur du prochain objet rencontré dans le fichier d'entrée. On associe ensuite cette valeur obtenue à l'attribut **température-air**, élément d'une instance de rapport horaire.

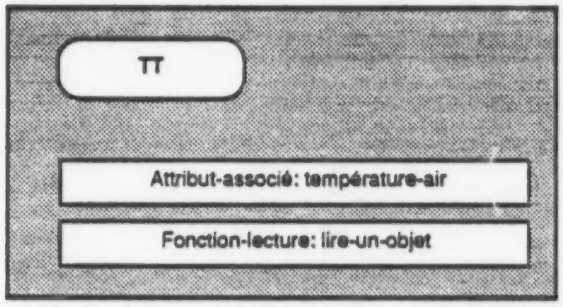



Figure 3.18 Structure des schémas utilisés pour l'identification des paramètres météorologiques dans les rapports horaires bruts

### 3.3.3.3.2 Schémas utilisés pour la conversion d'unités

La figure 3.19 illustre la structure de ce type de schéma. Nous avons d'abord le nom du schéma (ici **température-air**), qui représente un attribut météorologique. Ce schéma contient les opérations nécessaires à la conversion d'unités. Ces opérations sont définies à partir de trois attributs:

- **conversion-addition**: lorsque les unités doivent être additionnées par un certain facteur (c'est le cas pour la conversion de °C en °K).
- **conversion-multiplication**: lorsque les unités doivent être multipliées par un certain facteur (c'est le cas pour la conversion de millibars en pascals).
- **conversion-tableau**: lorsque les unités sont sous une forme numérique, correspondant à un index dans un tableau.

Un seul de ces attributs peut avoir une valeur non nulle. Ainsi, on ne peut définir pour un même paramètre une conversion d'unités et une référence à un tableau.

Ce schéma contient aussi des attributs définissant les unités de différentes variables avant et après conversion. Par exemple, le schéma **température-air** a les attributs **unités-CMC** et **unités-OASIS**. Ces attributs apparaissent à titre informatif pour l'usager du prototype.

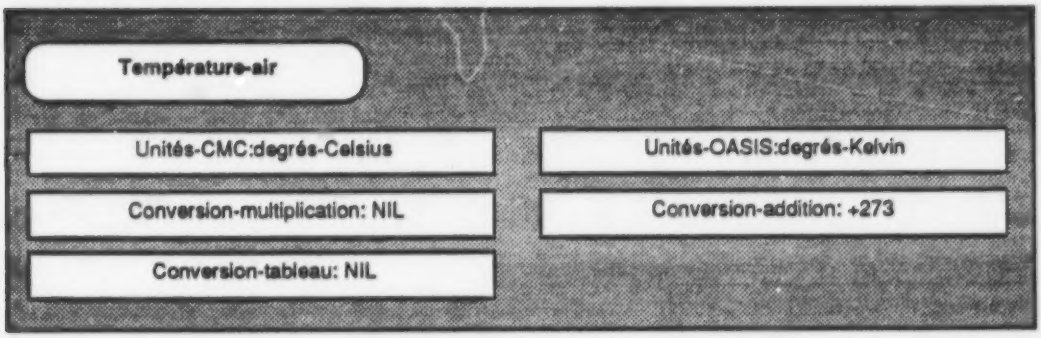



Figure 3.19 Structure des schémas utilisés pour la conversion d'unités des paramètres météorologiques

### 3.3.3.4 Sélection d'un fichier contenant des observations

Cette opération vise à spécifier aux routines de décodage, par une intervention de l'usager, le nom d'un fichier contenant des rapports horaires bruts. Cette spécification se fait par un simple échange question/réponse.

### 3.3.3.5 Décodage

La première étape du processus de décodage se caractérise par la création de schémas et de l'initialisation des attributs contenant les paramètres météorologiques.

L'ensemble de l'opération de décodage est illustré à la figure 3.20. L'opération se fait à partir du fichier contenant les observations brutes. Typiquement ce fichier contient environ 6 heures de rapports (soit entre 800 et 1,200 rapports), originant des stations manuelles définies sur la grille d'OASIS.

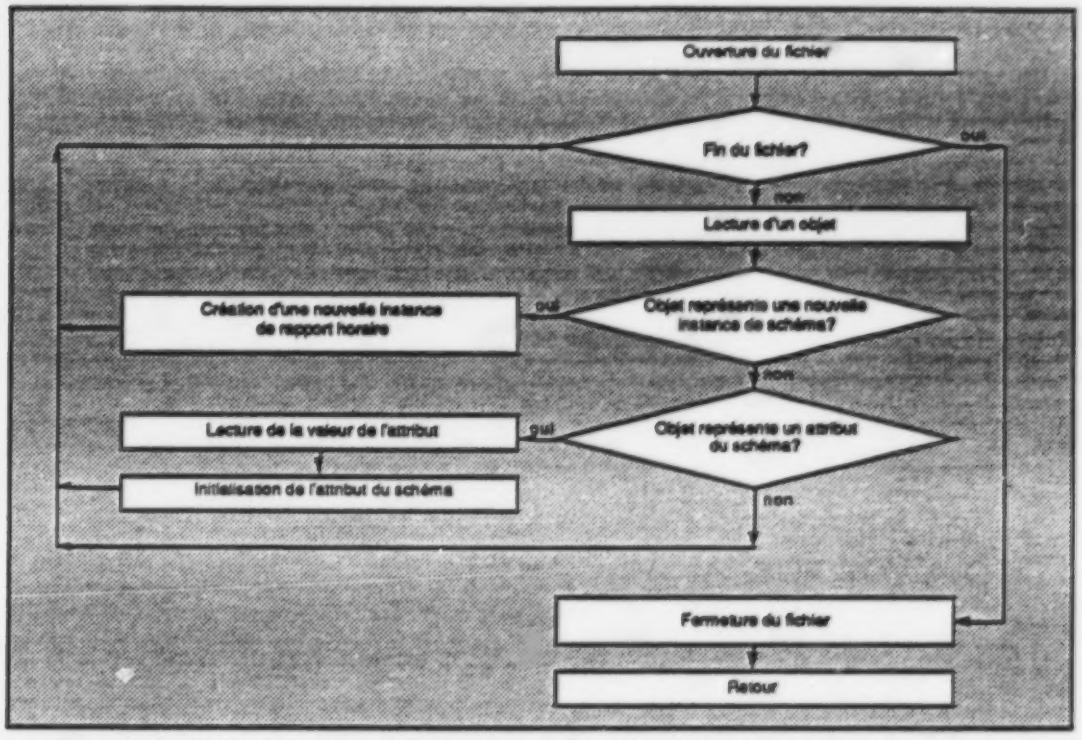



Figure 3.20 Illustration du processus de décodage des données brutes

Le fichier est examiné par les routines de décodage du début à la fin. Pour chaque nouvelle occurrence de rapport horaire, un nouveau schéma est créé et les valeurs de ses attributs sont initialisées à NIL. Les routines parcourent ensuite le reste du rapport pour initialiser les attributs identifiant les différents paramètres météorologiques. L'initialisation des attributs d'un rapport donné se termine lorsqu'une nouvelle instance de rapport a été identifiée ou lorsque la fin du fichier a été atteinte.

Les schémas nouvellement créés sont ajoutés à une liste. Lorsque la fin du fichier est atteinte, tous les schémas représentant des rapports horaires ont été définis ainsi que l'information météorologique qu'ils contenaient. La prochaine étape du processus de décodage consiste à éliminer les valeurs possiblement erronées contenues dans les rapports bruts.

### 3.3.3.6 Vérification des valeurs

Le contrôle de la qualité des données brutes est assumé par Environnement Canada. Les effets de ce contrôle de qualité sont indiqués par une astérisque (*) lorsque la valeur d'une

variable apparaît suspecte. Par exemple, un rapport dont la température de l'air serait de 2000 °C apparaîtrait ainsi dans un schéma:

| Température-air: 2000.0* |
|---|

Pour éliminer ces valeurs suspectes, les schémas de rapports horaires sont examinés un à un, attribut par attribut. Les attributs contenant des valeurs suspectes (donc accolés d'une astérisque) sont initialisés à NIL. Cette élimination n'affecte que les attributs contaminés par les valeurs erronées; le reste du rapport n'est pas rejeté pour autant.

### 3.3.3.7 Conversion d'unités et de symboles

L'opération suivante consiste à effectuer des opérations de conversion. Le tableau 3.7 montre la liste des opérations de conversion effectuées. Ces conversions, sauf la conversion de listes, se font par le biais des attributs définis dans les schémas représentant les attributs météorologiques. L'ensemble des conversions se fait en trois opérations: la première réunit dans une liste tous les attributs qui nécessitent une conversion impliquant l'opération addition, la seconde, l'opération multiplication et la troisième l'opération index. Ces opérations sont appliquées pour chacun des rapports horaires décodés.

manipulations de listes sur les attributs suivants:

- heure-officielle-observation
- heure-standard-observation

conversion d'unités sur les attributs suivants:

- pression-niveau-mer: de millibars en pascals
- température-air: de °C en °K
- visibilité: d'hectomètres en mètres

conversion de codes numériques en codes alpha-numériques pour les attributs suivants:

- caractère-vent
- couverture-cumulative-nuages
- type-nuages
- mesure-plafond
- phénomènes-atmosphériques

Tableau 3.7 Liste des opérations de conversions

### 3.3.3.8 Définition de noms significatifs

Les schémas créés durant le décodage des données brutes ont reçu des noms qui ont été générés automatiquement par l'ordinateur, du genre SA-1234. Bien que cela fasse peu de différence pour l'ordinateur, il serait souhaitable que ces schémas aient des noms plus significatifs afin de faciliter leur identification par les usagers. Nous avons décidé d'adopter une nomenclature de type CODE-YYMMJJHHHH, qui a été introduite à la section 3.3.2.2. Cette opération se fait par une simple concaténation de caractères dérivées des valeurs contenues dans les schémas.

### 3.3.3.9 Archivage des schémas

Knowledge Craft fournit certains utilitaires qui permettent d'archiver des schémas sur disque. Nous avons employé deux de ces utilitaires, le gestionnaires de base de données (*database-manager*) et le gestionnaire de sauvegarde (*save-manager*).

Initialement nous avons utilisé le gestionnaire de base de données, mais ce dernier s'est révélé d'une lenteur épouvantable (les opérations d'archivage pouvaient prendre plus d'une heure sur le VAX 8650), et ce pour environ six heures de rapports. Nous avons donc cru qu'il valait la peine de développer un ensemble de routines spécialement dédiées à l'archivage automatique des données sur disque, à l'aide du gestionnaire de sauvegarde, plus performant.

La sauvegarde des schémas se fait en deux étapes. D'abord, tous les schémas de rapports horaires sont rassemblés par groupes d'une heure, en utilisant l'heure standard d'observation comme critère de sélection. Ces schémas sont ensuite archivés sur des fichiers distincts. Par exemple, les schémas de rapports horaires dont l'heure standard est le 28 mai 1988 à 22h00 TUC sont archivés sur un fichier différent de celles de 21h00 TUC et 23h00 TUC. En regroupant les observations par groupes d'une heure, nous pouvons ainsi avoir une gestion plus efficace de la mémoire en restreignant le nombre de schémas présents en tout temps dans la mémoire vive.

La seconde étape consiste à archiver les schémas définis pour une station donnée, pour un jour donné, dans un seul et même fichier. Cette opération permet de rassembler facilement toutes les observations correspondant à une station d'intérêt. Présentement, OASIS n'utilise que les rapports de Dorval. Il est donc plus économique pour le système d'accéder

aux rapports de Dorval par un seul fichier que d'avoir à collecter ces rapports dans les 24 fichiers générés, pour un jour donné, pour l'ensemble des stations.

Le gestionnaire de sauvegarde archive les schémas sous forme de fichiers texte, plus précisément comme des objets LISP. Par exemple, l'observation de Dorval du 28 mai à 21h00 TUC, apparaît dans un fichier sous le format illustré à la figure 3.21. Les attributs qui n'ont pas de valeur (comme "caractère-vent" sont initialisés à NIL).

```
(DEFSCHEMA YUL-8805282100 :PARALLEL :NOTIFY :CONTEXT $ROOT-CONTEXT
(INSTANCE RAPPORT-HORAIRE-YUL)  (ANNEE-OBSERVATION 1988) (MOIS-
OBSERVATION 5)
(JOUR-OBSERVATION 28) (HEURE-STANDARD-OBSERVATION 2100)
(HEURE-OFFICIELLE-OBSERVATION 2100) (PRESSION-NIVEAU-MER 101360.0)
(DIRECTION-VENT 330) (VITESSE-VENT 5) (CARACTERE-VENT)
(VENT-MAXIMUM) (TEMPERATURE-AIR 299.0)
(TEMPERATURE-POINT-DE-ROSEE 286.4) (COUVERTURE-CUMULATIVE-NUAGES BKN)
(TYPE-NUAGES SC) (OPACITE-NUAGES 6) (HAUTEUR-NUAGES 1524)
(MESURE-PLAFOND MESURE) (VISIBILITE 24100.0) (PHENOMENES-
ATMOSPHERIQUES))
```

Figure 3.21 Exemple de schéma de rapport horaire archivé

Ceci complète l'ensemble des opérations faites sur les rapports horaires.

## 3.4 Représentation des sorties de modèles numériques

### 3.4.1 Description

Les modèles numériques sont des programmes informatiques qui, à l'aide de systèmes d'équations différentielles, simulent les processus physiques qui se produisent dans l'atmosphère. Ces simulations permettent, à partir d'un cliché de l'atmosphère en un temps donné (les analyses objectives), de prédire son évolution future.

Les équations qui décrivent l'état de l'atmosphère ainsi que les méthodes numériques pour les solutionner sont variées; souvent les méthodes employées vont donner leurs noms aux modèles numériques. Au Canada les deux modèles numériques opérationnels portent le nom de SPECTRAL (méthode d'intégration spectrale) et EFR (méthode d'intégration aux Éléments Finis Régionaux).

Certains modèles sont destinés à la prévision à courte échéance (0 à 2 jours), d'autres à moyenne échéance (entre 0 et 7 jours). Au Canada le modèle EFR est utilisé pour les prévisions de 0 à 2 jours, le modèle spectral pour les prévisions de 0 à 7 jours.

A cause de leur caractère très spécialisé, ces programmes sont développés, en général, par des équipes de chercheurs qui travaillent au niveau gouvernemental ou universitaire. Au Canada, la division de Recherche en prévision numérique (RPN), d'Environnement Canada est l'organisme responsable du développement et du support des modèles numériques canadiens utilisés dans les bureaux météorologiques nationaux.

#### 3.4.1.1 Distribution géographique

##### 3.4.1.1.1 Coordonnées horizontales

Les sorties des modèles numériques ont une structure de données quadri-dimensionnelle: l'état d'une analyse ou d'un modèle peut se définir par l'état de ses variables, dans un espace tri-dimensionnel, pour un temps donné. Pour des raisons de commodité (entre autres pour faciliter la visualisation des résultats), les sorties des analyses et des modèles sont conservées sur des grilles bi-dimensionnelles définies dans le plan horizontal. Ainsi, pour un temps donné, les éléments de base des sorties de modèles et des analyses sont constitués d'un ensemble de grilles bi-dimensionnelles définies à des niveaux distincts dans la verticale (voir figure 3.20). Les sorties du modèle EFR sont définies sur une grille polaire stéréographique conforme à 60° Nord, ayant une résolution de 152.4 km et couvrant tout l'hémisphère nord.

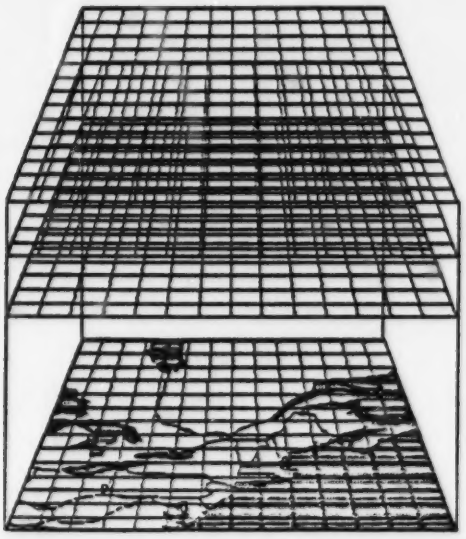


Figure 3.22 Illustration de la structure tri-dimensionnelle des sorties de modèles

#### 3.4.1.1.2 Coordonnées verticales

En météorologie deux types de coordonnées sont souvent utilisés pour définir la structure verticale des modèles numériques: les surfaces de pression constante et les surfaces $\sigma$. Les sorties du modèle EFR sont disponibles sous ces deux types de coordonnées.

##### 3.4.1.1.2.1 Coordonnées de pression

En général, les analyses objectives et les sorties de modèles utilisées en météorologie opérationnelle sont définies sur des surfaces de pression constante. Des accords internationaux ont permis de définir certains niveaux standards. Ces niveaux, au nombre de 11, sont les suivants: 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 et 50 mb. La figure 3.5 montre la distribution verticale de ces niveaux dans l'atmosphère standard de l'OACI[1].

[1]OACI: Organisation de l'aviation civile internationale.

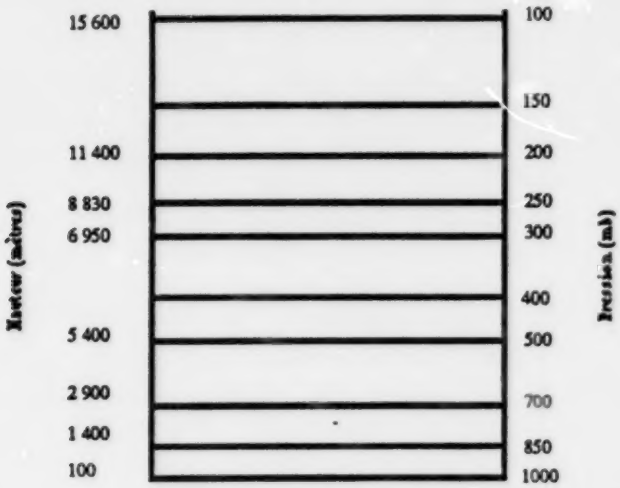



Figure 3.23 Hauteur des niveaux de pression dans l'atmosphère standard de l'OACI

### 3.4.1.1.2.2 Coordonnées sigma

La coordonnée $\sigma$ est définie comme étant $p/p_S$, p étant la pression à un niveau donné dans l'atmosphère et $p_S$ la pression à la surface. Ce système de coordonnées est généralement réservé à l'usage interne des modèles numériques. Il amène une simplification de certaines équations en permettant à la surface des modèles d'épouser la topographie du globe terrestre. La version du modèle EFR utilisée pour le développement du prototype compte 19 niveaux $\sigma$ dans la verticale.

La figure 3.24 montre une comparaison entre les niveaux de pression constante et les niveaux $\sigma$ du modèle EFR, sous 10 km, selon l'atmosphère standard de l'OACI, en supposant que la surface $\sigma$ du modèle est au niveau de la mer. On peut remarquer que la résolution des sorties du modèle EFR en coordonnées $\sigma$ est supérieure à celles des sorties en coordonnées de pression, surtout dans les bas niveaux de l'atmosphère. Il faut cependant noter qu'au temps zéro, la résolution accrue du modèle n'est d'aucune utilité puisque les variables du modèle sont interpolées à partir des niveaux standards des analyses objectives. Les avantages de la plus grande résolution du modèle peuvent se révéler durant l'intégration, lorsque de nouveaux processus météorologiques sont générés par le modèle.

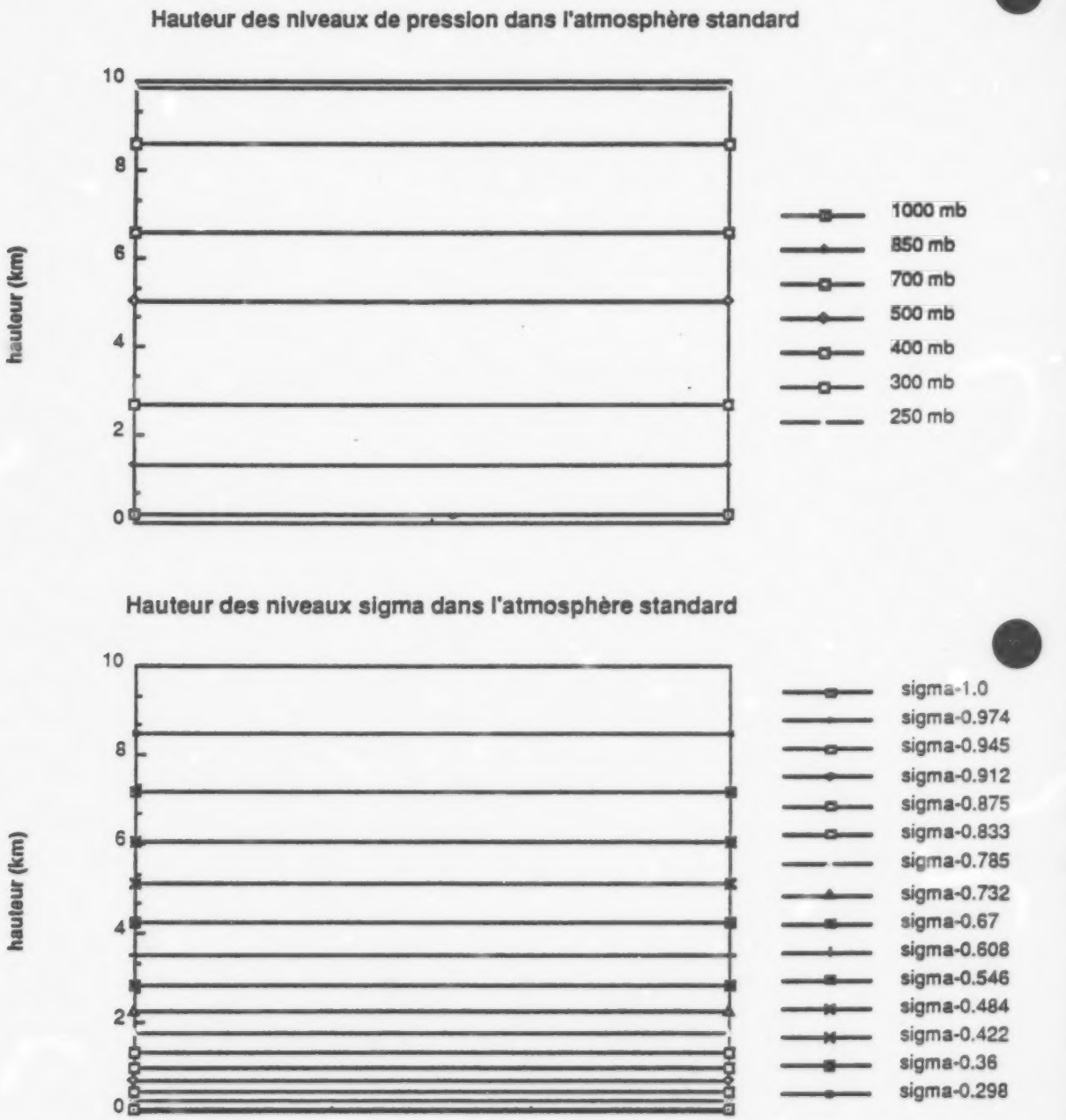



Figure 3.24 Comparaison entre les niveaux sigma et les niveaux standards sous 10 km.

#### 3.4.1.1.2.3 Conversion de coordonnées

Le prototype a été développé à partir de sorties disponibles en coordonnées de pression, que nous avions pu obtenir vers la fin de février 1988. A ce moment, il était plus simple d'obtenir les sorties du modèle sous ce format qu'en coordonnées $\sigma$. Il était cependant évident que la résolution verticale des sorties du modèle, disponibles aux niveaux standards seulement, ne permettrait pas d'atteindre un niveau de précision satisfaisant.

C'est pourquoi, durant la collecte de données, nous avons préféré prendre les sorties du modèle en coordonnées $\sigma$ uniquement (nous n'avions pas l'espace-disque nécessaire pour conserver les données dans les deux formats et nous devions restreindre le temps de transmission). L'intégration de ce nouveau format de données dans le prototype s'est cependant avérée plus difficile que prévue, de sorte que les tests préliminaires ont dû être effectués avec les sorties du modèle définies en coordonnées de pression.

Nous avons donc dû convertir les sorties disponibles de coordonnées sigma en coordonnées de pression. Le document présenté à l'annexe III (*Conversion des sorties du modèle EFR de coordonnées sigma en coordonnées de pression*) décrit la méthode utilisée pour faire cette conversion.

### 3.4.1.2 Distribution temporelle

Les sorties du modèle sont disponibles, pour une période allant de 0 à 36 heures, par intervalles de 3 heures, pour chaque prévision.

### 3.4.1.3 Éléments météorologiques disponibles

Le tableau 3.8 montre la liste des variables du modèle que nous avons retenues durant la période de collecte des données. Seules les variables dont le nom est souligné sont utilisées pour la version actuelle du prototype. L'intégration des variables non utilisées est prévue pour la prochaine étape de développement du prototype. Voici maintenant une description plus détaillée des variables du modèle retenues pour le prototype.

**Pression à la surface**
La pression atmosphérique à la surface représente le poids d'une colonne d'air, de superficie unitaire, qui s'étend de la surface du sol jusqu'au sommet de l'atmosphère [Wallace et Hobbs, 77]. Puisque la pression diminue avec l'altitude, la pression à la surface sera fonction de la topographie. Ce champ est rarement utilisé en météorologie opérationnelle, entre autres parce que les effets de la topographie masquent les variations causées par la distribution des creux et crêtes de pression.

**Variables géophysiques et climatologiques, définies en surface**

- Topographie
- Masque global terre-mer
- Couverture de neige
- Température profonde du sol
- Couverture de glace
- Longueur de rugosité
- Albédo
- Température de la mer
- Température de surface
- Humidité du sol

**Variables définies en surface.**

- Pression à la surface
- Température de surface
- Humidité profonde du sol
- Hauteur de la couche limite
- Flux de chaleur latente
- Couverture de nuages bas
- Couverture de nuages hauts
- Pression au niveau moyen de la mer
- Humidité du sol
- Humidité surface du sol
- Flux de chaleur sensible
- Flux de quantité de mouvement
- Couverture de nuages moyens
- Taux de précipitation
- Accumulation de précipitations depuis t=0.

**Variables définies en altitude**

- Hauteur du géopotentiel
- Dépression du point de rosée
- Divergence
- Vent est-ouest
- Énergie turbulente
- Température
- Tourbillon absolu
- Mouvement vertical
- Vent nord-sud

Tableau 3.8 Liste des variables du modèle EFR disponibles

**Pression au niveau de la mer**

Tel que mentionné à la section 3.3.2.2, la pression au niveau de la mer est une valeur extrapolée de la pression atmosphérique à la surface. La figure 3.25 montre une comparaison entre les champs de pression à la surface et la pression au niveau de la mer. Ces deux champs sont extraits des sorties du modèle EFR, pour le cas du 3 juin 1988 à 00h00 TUC. Ces cartes, ainsi que toutes les autres cartes qui apparaissent dans ce document, ont été tracées sur un Macintosh par un programme PASCAL développé par l'auteur de ce document.

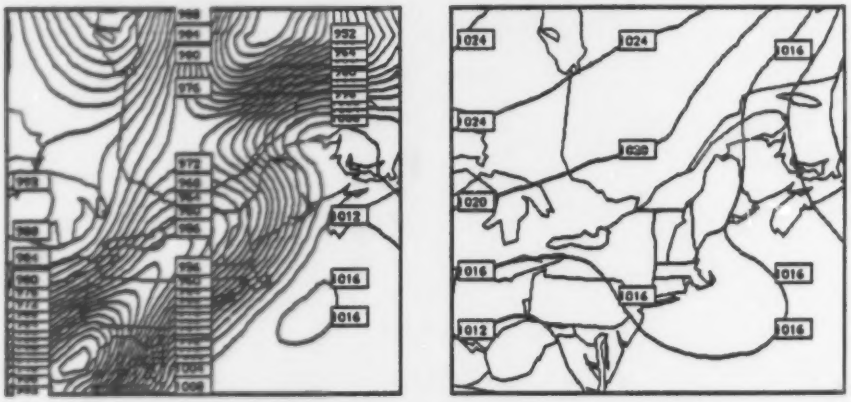



Figure 3.25 Exemples de champs de pression
Carte de gauche: champ de pression à la surface
Carte droite: champ de pression extrapolé au niveau de la mer
Unités: millibars

**Hauteur du géopotentiel**

Le géopotentiel $\phi$, à une hauteur z dans l'atmosphère, est défini comme étant le travail requis pour élever une masse de 1 kg du niveau moyen de la mer à la hauteur z. Ce champ est utilisé comme coordonnée verticale dans la plupart des applications où l'énergie joue un rôle important. Le géopotentiel, à une hauteur donnée, peut être déterminé par l'équation

$$\phi(z) = \int_0^z g \, dz$$

où $g$ est l'accélération dûe à la gravité.

Ce champ est habituellement analysé sur des surfaces de pression constante. En divisant la valeur du champ en un point donné par l'accélération dûe à la gravité, nous obtenons la hauteur, au dessus du niveau de la mer, où se situe le niveau de pression en question. Conceptuellement, il est plus facile de se représenter des valeurs de hauteurs plutôt que des valeurs d'énergie potentielle; c'est pourquoi on utilise la hauteur du géopotentiel plutôt que le géopotentiel lui-même.

L'analyse de ce champ sur des surfaces de pression constante (par exemple à 1000 où à 850 millibars) permet de repérer les régions de hautes et faibles hauteurs, qui correspondent respectivement à des régions de hautes et basses pressions à la surface.

Ce champ est très utile car il nous donne un point de repère dans la verticale. Par exemple, en utilisant la température définie aux niveaux 1000 et 850 millibars, et la hauteur de ces niveaux, donnée par la hauteur du géopotentiel, il est possible d'interpoler la température dans la verticale entre ces deux niveaux. La figure 3.26 montre des exemples de ce champ pour les niveaux 1000 et 850 millibars, extraits des sorties du modèle EFR, pour une prévision de 12 heures initialisée à partir des données du 3 juin 1988 à 00h00 TUC. D'autres exemples de ce champ sont illustrés dans les figures 5.2, 5.3 et 5.4.

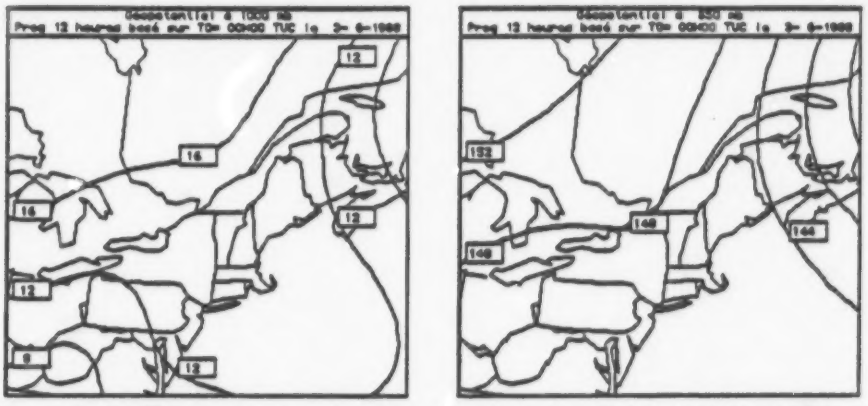


Figure 3.26 Exemple de champs de géopotentiel à 1000 et 850 mb
Unités: décamètres

**Température**

Ce champ indique la température de l'air à un niveau de pression donné. La figure 3.27 montre des exemples de ce champ pour les niveaux 1000 et 850 millibars, extraits des sorties du modèle EFR, pour une prévision de 12 heures initialisée à partir des données du 3 juin 1988 à 00h00 TUC. D'autres exemples de ce champ sont illustrés dans les figures 5.5, 5.6 et 5.7.

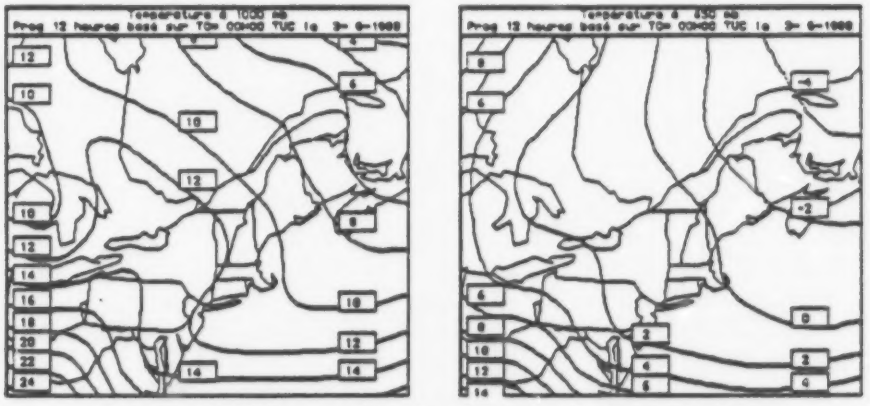


Figure 3.27 Exemples de champs de température
Unités: °Celsius

**Dépression du point de rosée**

Ce champ représente la différence de température entre la température de l'air et la température du point de rosée (voir section 3.3.2.2 pour la définition de la température du point de rosée). L'analyse de ce champ, à un niveau de pression donné, permet d'estimer le contenu de l'humidité de l'air. Les régions où cette valeur est faible sont associées à des régions d'air humide, et où cette valeur est élevée à des régions d'air sec. La figure 3.28 montre des exemples de ce champ pour les niveaux 1000 et 850 millibars, extraits des sorties du modèle EFR, pour une prévision de 12 heures initialisée à partir des données du 3 juin 1988 à 00h00 TUC. D'autres exemples de ce champ sont illustrés dans les figures 5.7, 5.8 et 5.10.

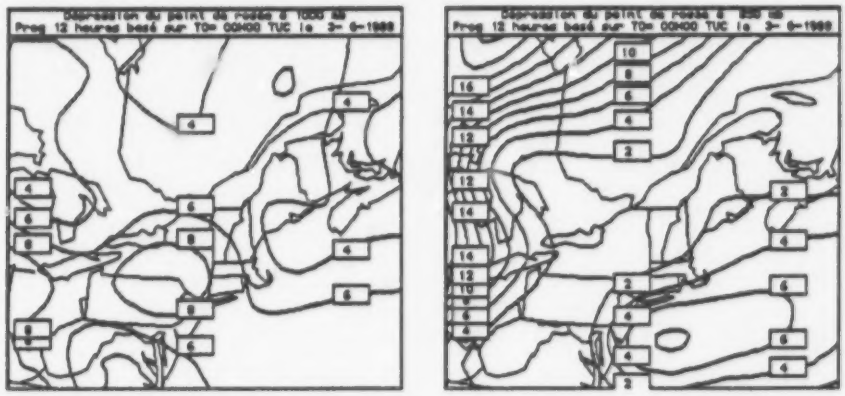


Figure 3.28 Exemples de champs de dépression du point de rosée
Unités: °C

**Mouvement vertical**
Le mouvement vertical peut être approximé par la relation suivante:

$$\omega = - \rho g w,$$

où $\omega = dp/dt$ est la dérivée totale de la pression à un niveau donné,
$\rho$ est la densité de l'air,
$w = dz/dt$ est la vitesse verticale de l'air.

Ce champ est directement proportionnel à la vitesse verticale de l'air en un point donné. L'analyse à grande échelle de ce champ permet d'identifier les régions où l'air est ascendant ou descendant. Da façon générale, de l'air en ascendance a tendance à se refroidir et à s'humidifier, de sorte que ce phénomène tend à accentuer ou à provoquer la formation de nuages et de précipitation. Par le phénomène inverse, du mouvement vertical descendant tend à réchauffer l'air, et donc à l'assécher et à provoquer la dissipation des nuages.La

figure 3.29 montre des exemples de ce champ pour les niveaux 1000 et 850 millibars, extraits des sorties du modèle EFR, pour une prévision de 12 heures initialisée à partir des données du 3 juin 1988 à 00h00 TUC. D'autres exemples de ce champ sont illustrés dans les figures 5.11, 5.12 et 5.13.

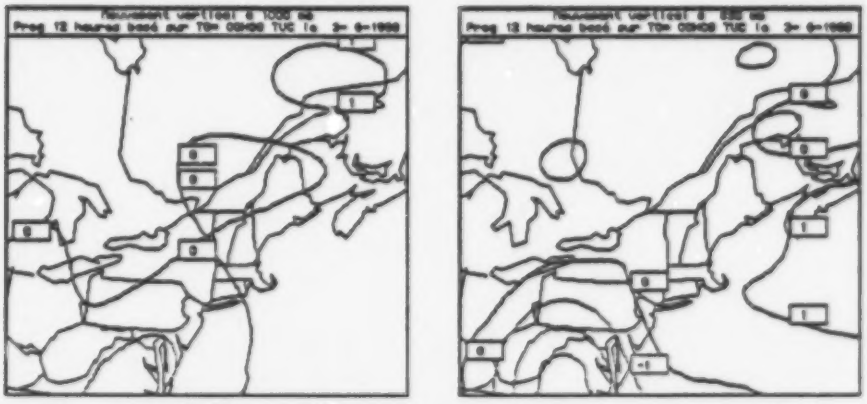


Figure 3.29 Exemples de champs de mouvement vertical

Unités: µbars/secondes

### 3.4.2 Modélisation conceptuelle des schémas de sorties de modèles

#### 3.4.2.1 Définition des classes

##### 3.4.2.1.1 Catégorisation selon le type de données

Comme les rapports horaires, les modèles numériques peuvent être catégorisés selon différentes classes hiérarchiques. D'abord, la classe **modèle-numérique** pourrait aussi faire partie de la classe **source-de-données-météorologiques** (voir figure 3.5).

##### 3.4.2.1.2 Catégorisation selon le pays d'origine

Comme pour les rapports horaires, nous pourrions classer les modèles numériques selon leur pays d'origine. En fait, cette distinction est peut-être moins nécessaire. Les modèles numériques sont des programmes très spécifiques qui ont peu de choses en commun entre eux. Même pour un seul pays il est difficile de trouver des liens communs entre différents modèles. Nous avons quand même conservé ce lien pour être consistants avec l'ensemble des liens définis pour les rapports horaires. Donc, dans cette organisation hiérarchique, la classe **modèle-numérique** contient les sous-classes de type **modèle-numérique-du-pays-A**. Ce lien est illustré à la figure 3.30.

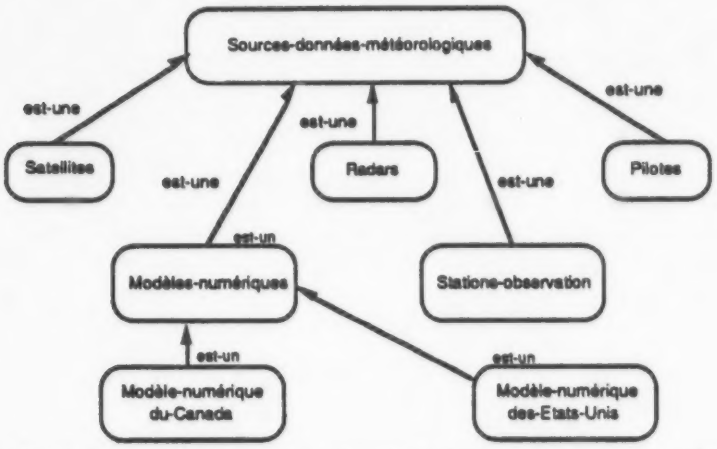



Figure 3.30 Illustration de la catégorisation des sorties de modèles selon le pays d'origine

### 3.4.2.1.3 Catégorisation selon le modèle

Dans la plupart des pays, les services météorologiques ont plus d'un modèle à leur disposition. Par exemple, le Canada possède deux modèles opérationnels, le modèle EFR et le modèle spectral, et il existe d'autres modèles qui sont en cours de développement. Chacun de ces modèles possède des caractéristiques qui lui sont propres, comme la méthode d'intégration employée et les équations de base utilisées. Ces caractéristiques de base peuvent déterminer en quelque sorte le squelette du modèle. Chaque classe de type **modèle-numérique-du-pays-A** pourrait se diviser en sous-classes de type **modèle-numérique-B-du-pays-A**. Pour des raisons d'économie d'espace, nous ferons référence à cette classe comme étant la classe **modèle-B**, les qualificatifs "numérique" et "du-pays-A" étant sous-entendu. Le lien entre ces deux classes est illustré à la figure 3.31.

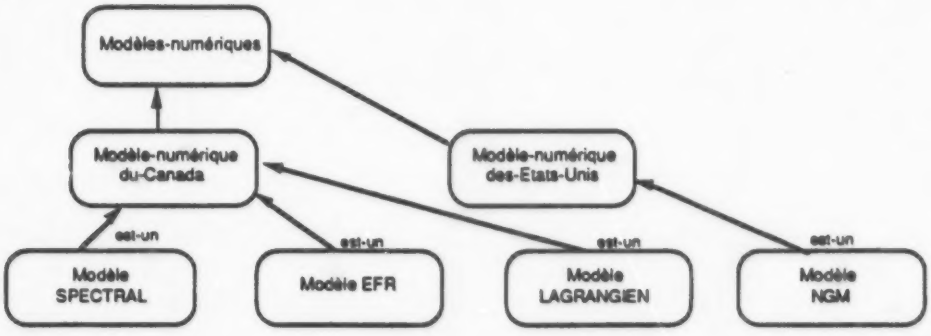



Figure 3.31 Illustration de la catégorisation des sorties de modèles selon le modèle utilisé

### 3.4.2.1.4 Catégorisation selon la version du modèle

Chaque modèle peut exister en différentes versions. Ces versions peuvent être définies par un ensemble de paramètres qui affectent l'exécution du modèle. Parmi ces paramètres mentionnons le pas de grille, le pas de temps, la discrétisation horizontale et verticale, et les paramètres de certaines équations. Par exemple, à l'hiver 1986, durant le programme CASP (*Coastal Atlantic Storm Program*), la division de Recherche en prévision numérique a fait tourner une version à haute résolution du modèle EFR parallèlement à la version opérationnelle. Durant cette période, les prévisions de deux versions distinctes du même modèle étaient disponibles. Mentionnons aussi que les chercheurs de la Division travaillent continuellement à optimiser les modèles, différentes versions de recherche du modèle peuvent donc exister pendant un temps donné. Il serait donc justifié de définir, pour chaque classe **modèle-B**, une sous-classe **version-C-du-modèle-B**. Ce lien est illustré à la section 3.32.

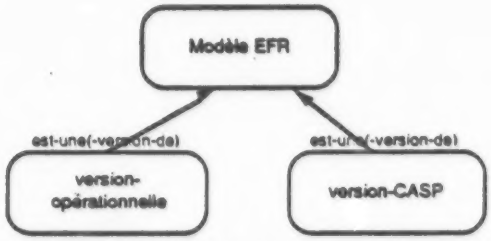



Figure 3.32 Illustration de la catégorisation des sorties de modèles selon la version du modèle

### 3.4.2.1.5 Catégorisation selon le post-traitement des sorties du modèle

Une fois qu'un modèle a complété ses prévisions, on peut présenter les sorties du modèle sous différents formats. On peut extraire seulement un sous-ensemble du domaine d'intégration du modèle, interpoler les sorties du modèle sur des niveaux non définis dans la version utilisée pour l'intégration, effectuer un lissage sur les sorties du modèle, etc. Ces diverses transformations nous permettent de définir une sous classe **sortie-D-de-la-version-C-du-modèle-B** de la classe **version-C-du-modèle-B**. Ce lien est illustré à la figure 3.33.

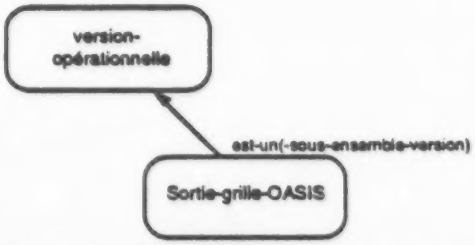



Figure 3.33 Illustration de la catégorisation des sorties de modèles selon le post-traitement

### 3.4.2.1.6 Catégorisation selon les variables du modèle

L'analyse d'une prévision se fait par l'étude des champs des variables prévues par le modèle. Par exemple on s'intéressera aux valeurs prévues des champs de géopotentiel, de température, de mouvement vertical, etc. Chacune des variables du modèle peut donc être vue comme étant la sous-classe **variable-E-de-la-sortie-D-de-la-version-C-du-modèle-B** de la classe **sortie-D-de-la-version-C-du-modèle-B**. Ce lien est illustré à la figure 3.34.

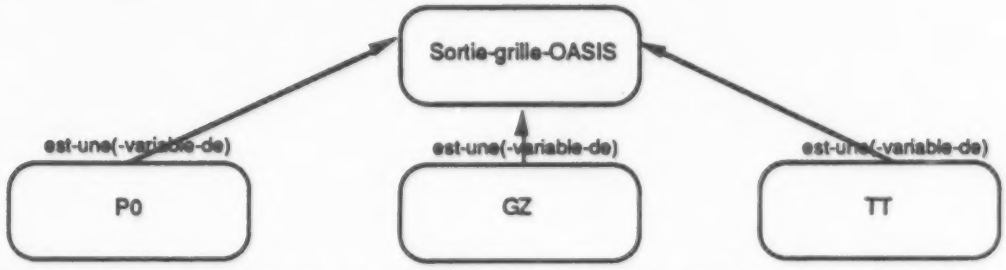



Figure 3.34 Illustration de la catégorisation des sorties de modèles selon les variables utilisées

### 3.4.2.1.7 Catégorisations selon l'heure initiale et l'heure de validité de la prévision

La classification énoncée dans les paragraphes ci-dessus permet de définir de façon très précise l'état d'un modèle dans l'espace. Tout comme pour les rapports horaires, en ajoutant les paramètres temporels à cette classification, nous pouvons définir les **instances** de prévisions de modèles.

Il existe cependant pour les sorties de modèles deux niveaux de définition dans le temps. Le premier niveau peut être défini comme étant l'heure d'initialisation d'une prévision, le second comme l'heure de validité d'une prévision. A partir d'un état initial, un modèle peut en effet générer toute une série de prévisions correspondant à des clichés de l'atmosphère valides pour un temps donné.

Présentement, le modèle EFR est exécuté en temps réel deux fois par jour, à 00h00 et 12h00 TUC. Ceci a pour conséquence que plusieurs prévisions, générées à partir de temps initiaux différents, peuvent être valides pour un même temps. En conservant les sorties des modèles à toutes les 12 heures, et en limitant l'intégration du modèle à 48 heures, nous pouvons consulter jusqu'à cinq prévisions différentes de la même variable, valides pour un temps donné. Par exemple, à 12h00 TUC le 28 mai 1988, les prévisions suivantes seraient disponibles.

- la prévision de 0 heures initialisée à 12h00 TUC le 28 mai 1988
- la prévision de 12 heures initialisée à 00h00 TUC le 28 mai 1988
- la prévision de 24 heures initialisée à 12h00 TUC le 27 mai 1988
- la prévision de 36 heures initialisée à 00h00 TUC le 27 mai 1988
- la prévision de 48 heures initialisée à 12h00 TUC le 26 mai 1988

Nous pouvons catégoriser ces deux niveaux temporels par une classe **prévision-E-de-la-variable-D-de-la-version-C-du-modèle-B**, représentant l'ensemble des

prévisions d'une variable initialisées à partir d'un temps t; les instances de cette sous-classe peuvent alors représenter les prévisions définies pour un temps t + Δt, avec Δt différent pour chaque instance. La figure 3.35 montre un exemple des liens déterminés par ces classes, avec deux types d'instances de sorties de modèles. Ces deux types d'instances définissent les sorties du modèle pour l'ensemble de la grille d'OASIS et pour l'aéroport de Dorval.

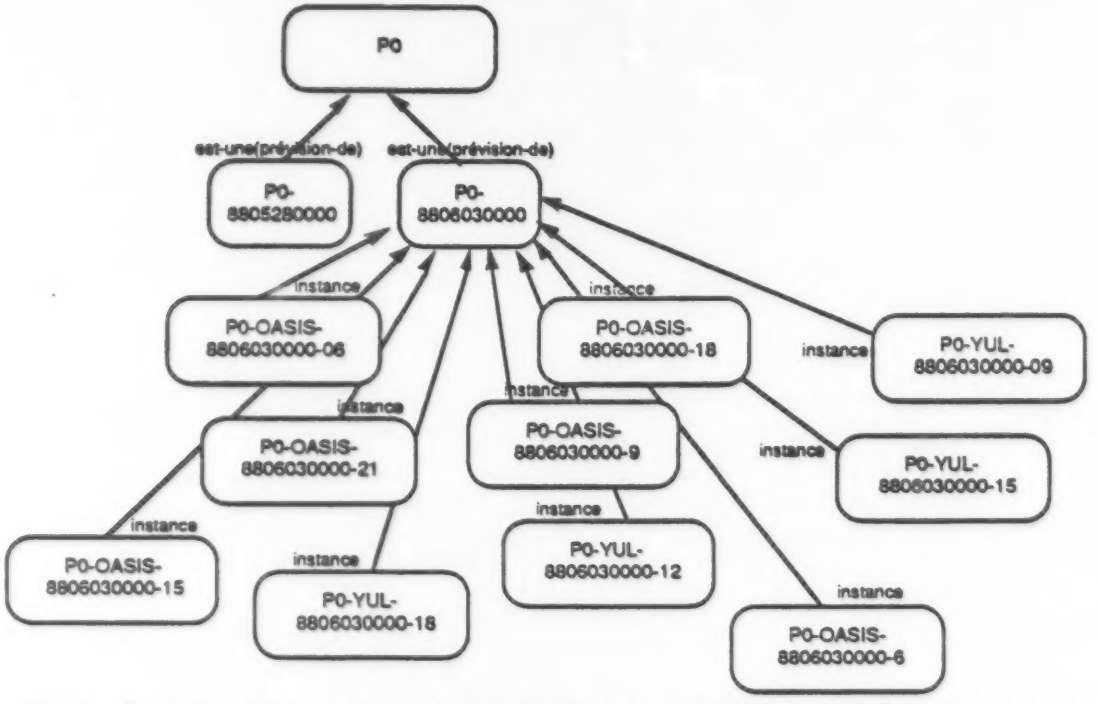



Figure 3.35 Illustration de la catégorisation des sorties de modèles selon les heures initiales et de validité de la prévision

La figure 3.36 montre la hiérarchie formée par l'ensemble des schémas.

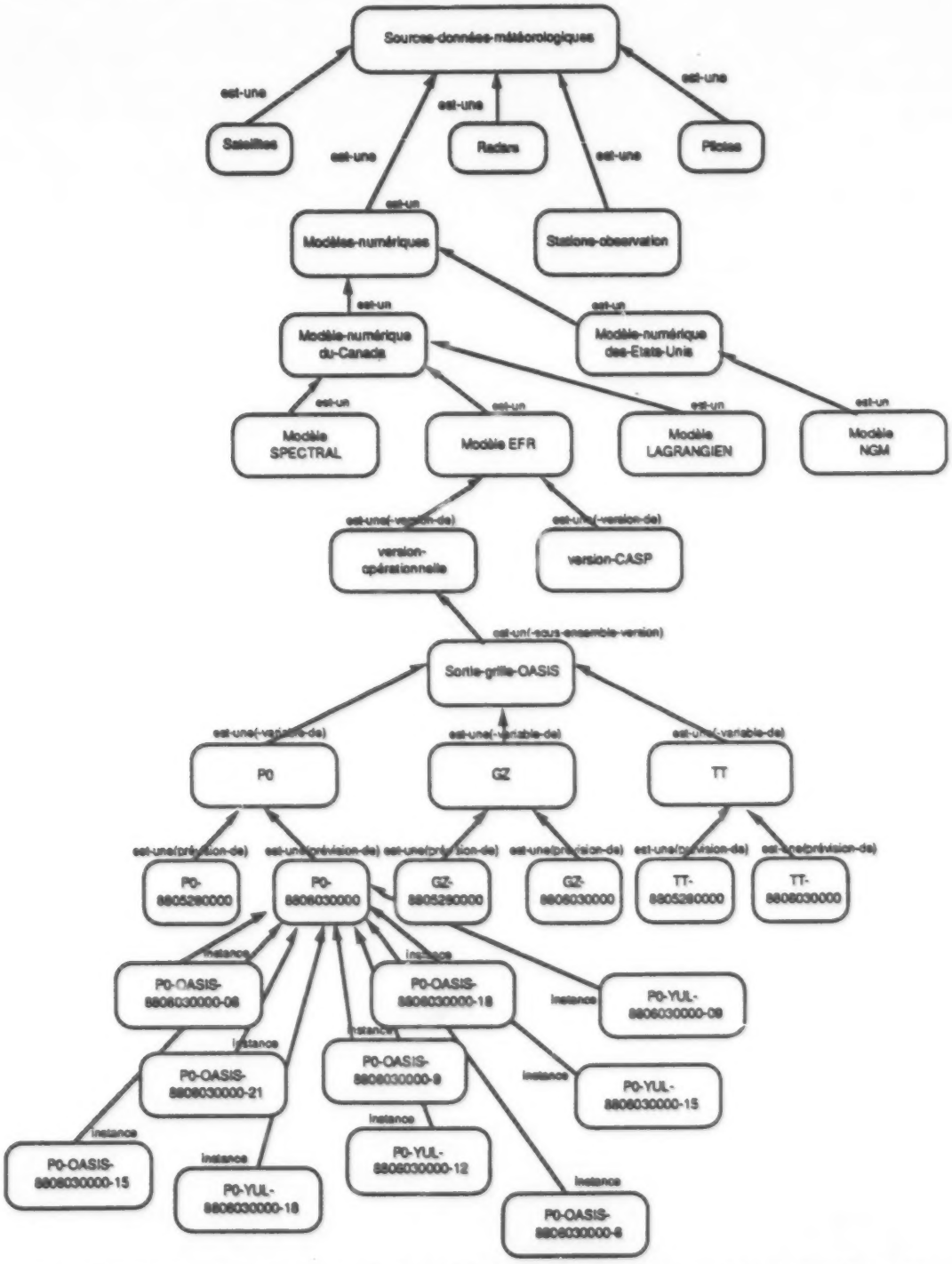



Figure 3.36 Illustration de la hiérarchie formée par l'ensemble des schémas

#### 3.4.2.1.8 Classes implantées dans le prototype

Comme pour les rapports horaires nous avons restreint la hiérarchie des schémas. Pour la version actuelle du prototype, nous avons conservé cinq niveaux, éliminant ainsi trois niveaux. Cette restriction sur le nombre de classes vient du fait que nous n'avons utilisé qu'une seule version d'un seul modèle, éliminant ainsi le besoin de catégoriser selon le pays et l'ensemble des versions d'un modèle.

Ces cinq classes sont :

- la classe SOURCE-DONNÉES-MÉTÉOROLOGIQUES, qui regroupe l'ensemble des données météorologiques utilisées par le prototype,
- la classe SORTIE-MODÈLE-OASIS, qui représente l'ensemble des variables prévues par un modèle sur la grille d'OASIS,
- la classe VARIABLE (de-SORTIE-MODÈLE-OASIS), qui représente l'ensemble des prévisions d'une même variable,
- la classe VARIABLE-HEURE-INITIALE (de-SORTIE-MODÈLE-OASIS), qui représente l'ensemble des prévisions d'une même variable initialisées à partir d'un temps donné,
- les instances de la classe VARIABLE-HEURE-INITIALE, qui représentent l'ensemble des prévisions d'une même variable, initialisées à partir d'un temps donné, et valides $\Delta T$ heures après le temps initial de la prévision.

#### 3.4.2.2 Définition des attributs

Dans cette section nous nous intéresserons aux attributs des classes de schémas énoncées à la fin de la section précédente. Comme pour les rapports horaires, le schéma au sommet de la hiérarchie est le schéma SOURCE-DONNEES-METEOROLOGIQUES, dont la structure est discutée à la section 3.3.2.2.1.

##### 3.4.2.2.1 Attributs de la classe SORTIE-MODELE-OASIS

Cette classe pourrait contenir plusieurs attributs; deux seulement ont été implantés. La structure de ce schéma est illustrée à la figure 3.37; les noms des éléments qui apparaissent sur la figure sont ceux qui ont été implantés dans le prototype. Ces attributs sont un lien **est-un**, qui permet de relier cette classe à la classe supérieure **SOURCE-DONNEES-METEOROLOGIQUES**, et un attribut **domaine-sortie**, dont la valeur est un schéma qui contient les paramètres de la grille d'OASIS.

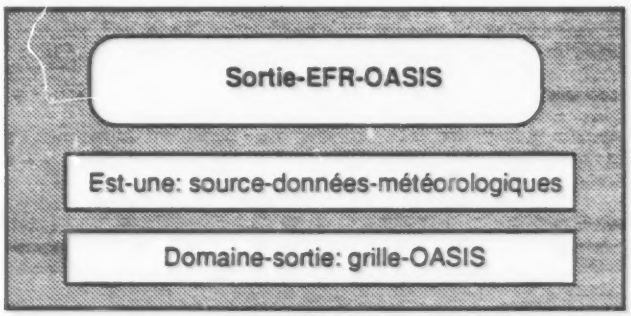



Figure 3.37 Illustration de la classe de schémas SORTIE-MODELE-OASIS

La structure du schéma **grille-OASIS** est illustrée à la figure 3.37. Ce schéma contient les paramètres de la grille nécessaires à sa localisation précise sur le globe terrestre. Voici la liste des paramètres de ce schéma, dont la détermination est expliquée en détail à l'annexe II du présent document, *Spécifications de la grille d'OASIS*.

**Résolution:**
C'est la distance entre deux points de grille, en mètres, à 60° Nord. Il est sous-entendu que la grille est de type polaire-stéréographique.

**Dimension-x:**
C'est le nombre de points de grille selon l'axe X de la grille.

**Dimension-y:**
C'est le nombre de points de grille selon l'axe Y de la grille.

**Coordonnée-x-pôle-nord:**
C'est la position du pôle nord, sur l'axe des X de la grille, en points de grille.

**Coordonnée-y-pôle-nord:**
C'est la position du pôle nord, sur l'axe des Y de la grille, en points de grille.

**Rotation-grille:**
C'est l'angle que fait l'axe des X de la grille avec le méridien de Greenwich.

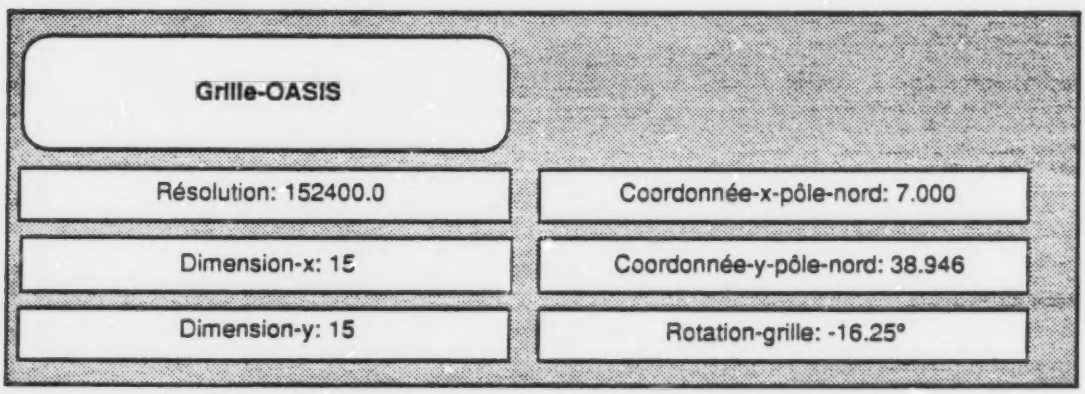



Figure 3.38 Illustration du schéma GRILLE-OASIS

### 3.4.2.2.2 Attributs de la classe VARIABLE

La classe VARIABLE représente les éléments météorologiques du modèle qui sont disponibles. La structure de ce schéma est illustré à la figure 3.38. Le nom utilisé pour définir les différentes variables dans la base de connaissances est le code de deux lettres utilisé par les fichiers standards RPN pour identifier la variable. Ce code a été choisi en fonction de la structure des données brutes. Voici la liste des autres attributs qui composent ce schéma.

**Est-une:**
Le nom de l'attribut sous-entendu ici est "est-une-variable-de". Cet attribut permet de faire le lien avec la classe **SORTIE-EFR-OASIS.**

**Nom-variable:**
C'est le nom courant de la variable. Son utilisation vise à aider l'usager dans l'identification de la variable, en affichant à l'écran le nom du champ. A la figure 3.38, le nom de la classe est **P0**, représentant la pression à la surface.

**Unités-CMC:**
Cet attribut représente le nom des unités dans lesquelles arrivent les sorties brutes du modèle EFR. Ces informations apparaissent à titre informatif pour l'usager du prototype.

**Unités-OASIS:**
Cet attribut représente le nom des unités dans lesquelles sont emmagasinées les sorties du modèle dans OASIS. Ces informations apparaissent à titre informatif pour l'usager du prototype.

**Conversion-multiplication:**
Cet attribut représente le facteur de conversion numérique à appliquer pour convertir les unités des sorties brutes du modèle aux unités d'OASIS.

**Conversion-addition:**
Comme l'attribut précédent, cet attribut représente un facteur de conversion à appliquer pour convertir les unités des sorties brutes du modèle aux unités d'OASIS. Une classe ne peut contenir à la fois ces deux derniers attributs.

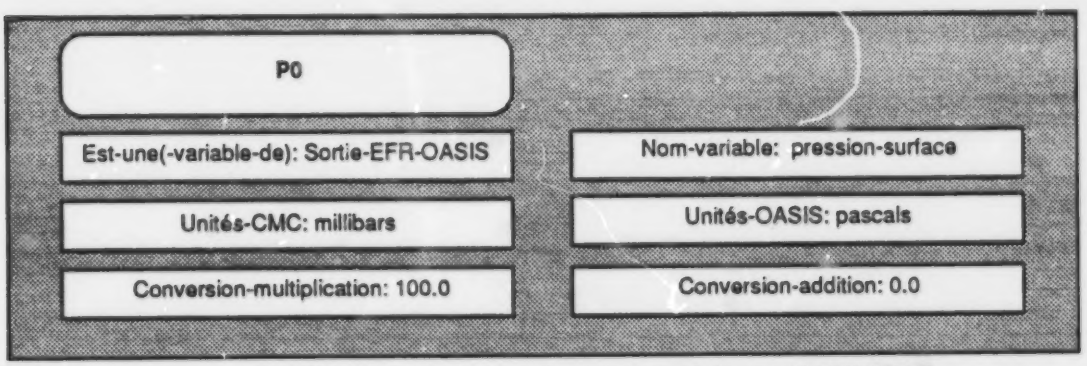



Figure 3.39 Illustration de la classe de schémas VARIABLE

#### 3.4.2.2.3 Attributs de la classe VARIABLE-HEURE-INITIALE

La classe **VARIABLE-HEURE-INITIALE** représente l'ensemble des prévisions du modèle générées à partir d'un temps initial. La structure de ce schéma est illustrée à la figure 3.39. Nous avons mentionné à la section 3.4.2.1.6 que les prévisions du modèle étaient disponibles pour plusieurs périodes. Le nom de la classe implanté dans OASIS est une concaténation du nom de la variable et du temps initial de la prévision. Le caractère unique du temps initial garantit l'unicité de la classe. Voici une description des attributs qui composent ce schéma.

**Est-une:**
Le nom de l'attribut sous-entendu ici est "est-une-variable-de". Cet attribut permet de faire le lien avec la classe **VARIABLE.**

**Passe-opérationnelle:**
Tel qu'indiqué à la section 3.4.3.1.1, la passe opérationnelle est un index allant de 0 à 5, qui identifie à quel moment du cycle d'assimilation des données le modèle a tourné. Ce cycle d'assimilation a une durée de 12 heures.

**Année-initialisation-prévision:**
C'est l'année durant laquelle le modèle a été initialisé (ex. 1988).

**Mois-initialisation-prévision:**
C'est le mois durant lequel le modèle a été initialisé. Le mois est un nombre allant de 1 à 12, représentant dans l'ordre habituel les mois de janvier à décembre.

**Jour-initialisation-prévision:**
C'est le jour durant lequel le modèle a été initialisé. Le jour peut aller de 1 à 31, selon le mois et les années.

**Heure-initialisation-prévision:**
C'est l'heure à laquelle le modèle a été initialisé. Cet attribut est exprimé sous la forme HHMM, où HH représente les heures et MM les minutes (par exemple 1200 représente 12 heures précises). Présentement, ce champ ne peut prendre que deux valeurs, soit 0000 et 1200, qui correspond aux heures où les modèles sont intégrés.

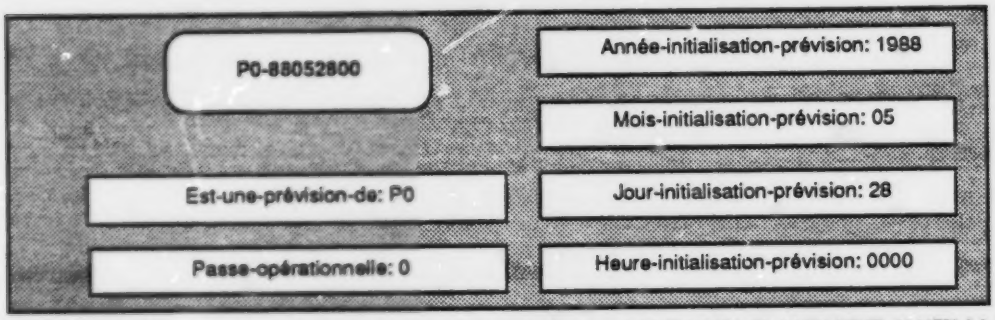


Figure 3.40 Illustration de la classe de schémas VARIABLE-HEURE-INITIALE

### 3.4.2.2.4 Attributs des instances de la classe VARIABLE-HEURE-INITIALE

Cette classe regroupe les instances de prévisions de variables du modèle initialisées à un temps donné. Présentement, deux types d'instances sont définies. La première contient des schémas qui représentent les sorties du modèle telles que définies sur la grille d'OASIS, la seconde des schémas qui représentent les sorties du modèle pour un seul point.

La quantité de données disponibles sur la grille d'OASIS excède en effet largement l'utilisation qu'en fait la version actuelle du prototype. Dans son état actuel, le prototype n'utilise les données que d'un seul point, situé au centre de la grille, au point x=7 et y=7. Tel que mentionné à l'annexe II (*Spécifications de la grille utilisée pour OASIS*), ce point

correspond exactement aux coordonnées géographiques de l'aéroport de Dorval. La justification de ces deux types d'instances est donc l'économie de mémoire.

#### 3.4.2.2.4.1 Instances définies sur la grille

La structure de base des instances de prévisions du modèle, définie sur la grille d'OASIS, est illustrée à la figure 3.40. Le nom de chaque instance est-une concaténation du nom de la variable, de l'adjectif "OASIS", du temps initial de la prévision et du nombre d'heures écoulées depuis le temps initial. Le symbole formé par l'ensemble de ces paramètres forme un nom unique qui peut être utilisé par la base de connaissances du système. L'adjectif "OASIS" sert à différencier les prévisions valides pour un même temps donné, qui sont définies pour l'ensemble de la grille et pour un ou plusieurs points sur la grille. Voici maintenant une description des attributs de cette classe de schémas.

**Instance:**
Cet attribut est utilisé pour faire le lien avec un schéma de la classe **VARIABLE-TEMPS-INITIAL**. Dans l'exemple de la figure 3.40, la valeur de cet attribut est la classe **PO-88052800**.

**Nombre-heures-prévision:**
Cet attribut représente le nombre d'heures écoulées depuis le début de la prévision. Présentement, les valeurs que peuvent prendre cet attribut sont restreintes à des multiples de 3, allant de 0 à 36 heures, et correspondant aux heures pour lesquelles les sorties brutes du modèle sont disponibles.

**Domaine-sortie:**
Cet attribut contient un schéma dont la valeur est un objet qui définit les paramètres de la grille. Ces descripteurs ont été introduits lors de la présentation de la classe SORTIE-MODELE-OASIS. Présentement, ce paramètre est initialisé au schéma GRILLE-OASIS, mais d'autres objets représentant des sous-grilles pourraient aussi être utilisés.

**Surface:**

Cet attribut contient les valeurs du champ aux points de grille. Cet attribut peut se présenter sous différentes formes, selon que le champ est défini à la surface du modèle, en coordonnées de pression ou en coordonnées σ. Si le champ est défini à la surface, alors on définit l'attribut SURFACE et on lui accole les valeurs du champ, définies dans un vecteur à deux dimensions. Si le champ est en coordonnées de pression ou en coordonnées σ, on définit un attribut en concaténant au symbole "sigma" ou "mb" (pour millibars), selon le cas, la valeur d'un niveau. On définira un attribut par champ disponible, ce qui implique que les instances de prévisions de modèle définies sur la grille ont une structure de données tri-dimensionnelle pour les variables définies en altitude. La figure 3.41 montre la représentation d'une prévision de 12 heures du champ de géopotentiel, valide dans cet exemple à 12h00 TUC le 28 mai 1988.

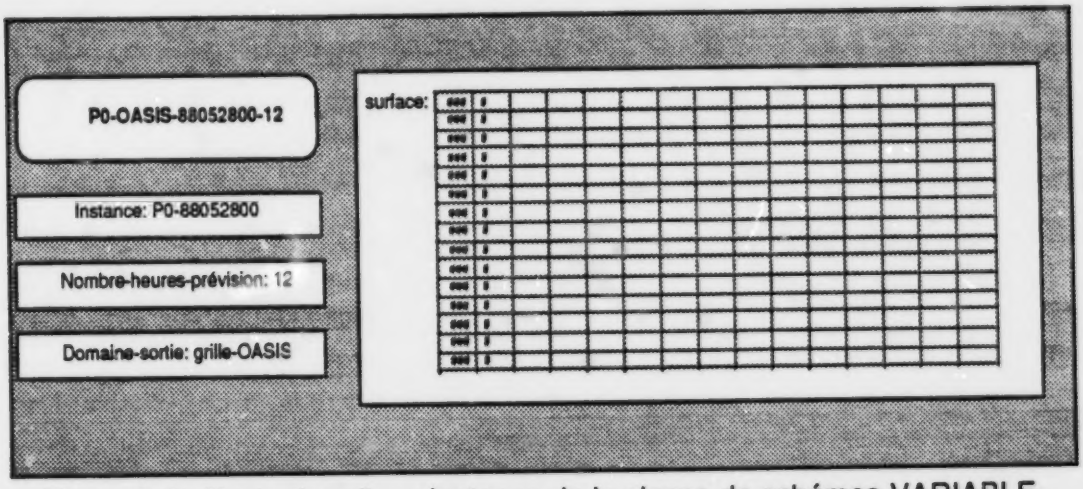



Figure 3.41 Illustration d'une instance de la classe de schémas VARIABLE-HEURE-INITIALE définies sur la grille d'OASIS, pour un champ de surface

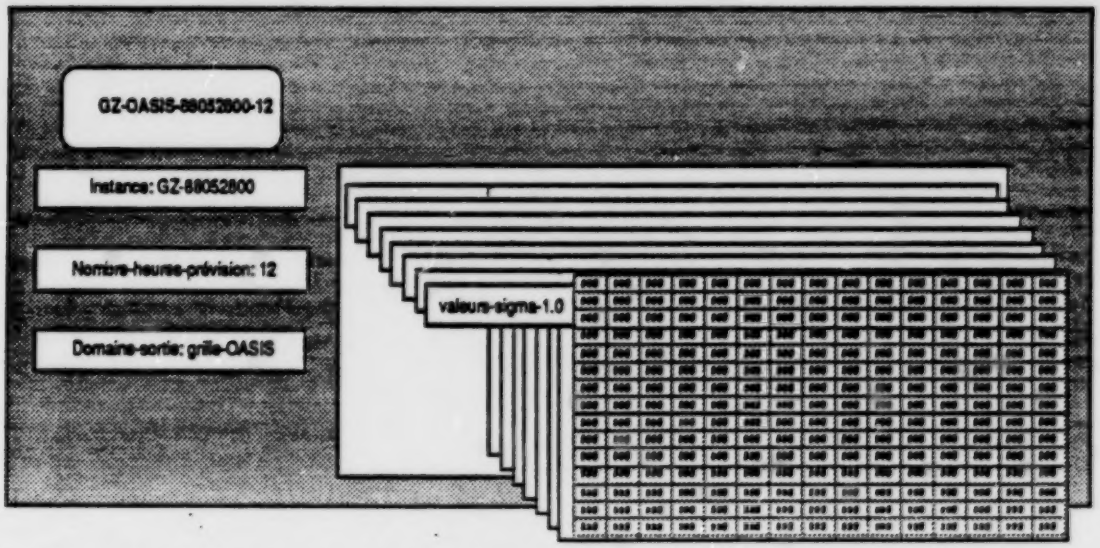



Figure 3.42 Illustration d'une instance de la classe de schémas VARIABLE-HEURE-INITIALE définies sur la grille d'OASIS, pour une série de champs en altitude

### 3.4.2.2.4.2 Instances définies pour un point sur la grille

Les schémas représentant les sorties du modèle pour un point donné ont une structure très similaire à ceux présentés à la section précédente. Seul l'attribut **valeur** a été introduit en remplacement de l'attribut **surface**. Comme l'indique son nom, l'attribut **valeur** contient la valeur de la variable définie au point indiqué par l'attribut **domaine-sortie**, pour le temps indiqué par la combinaison des attributs **nombre-heures-prévision** et des autres attributs temporels définis dans la classe **VARIABLE-TEMPS-INITIAL**. Il est important de souligner que quand la variable est définie en altitude, l'attribut **valeur** prend la forme d'une liste représentant les valeurs de la variable pour chaque niveau du modèle disponible.

Une illustration de la structure de ce schéma est présentée à la figure 3.42. Ce schéma représente la prévision de 12 heures de la pression à la surface, pour l'aéroport de Dorval, qui a été initialisée à partir des données du 28 mai 1988 à 00h00 TUC. L'attribut **domaine-sortie** contient la valeur **YUL**, qui regroupe l'ensemble des messages émis par l'aéroport de Dorval, et dont les attributs géographiques permettent la localisation sur la terre.

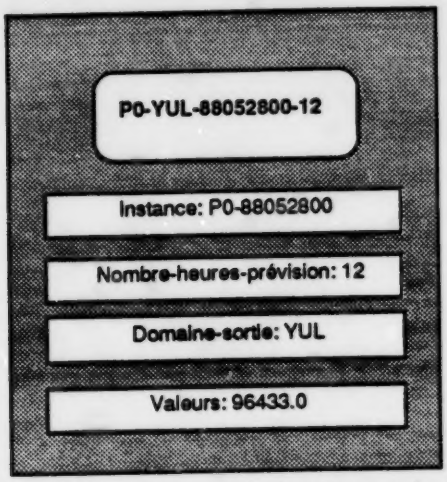
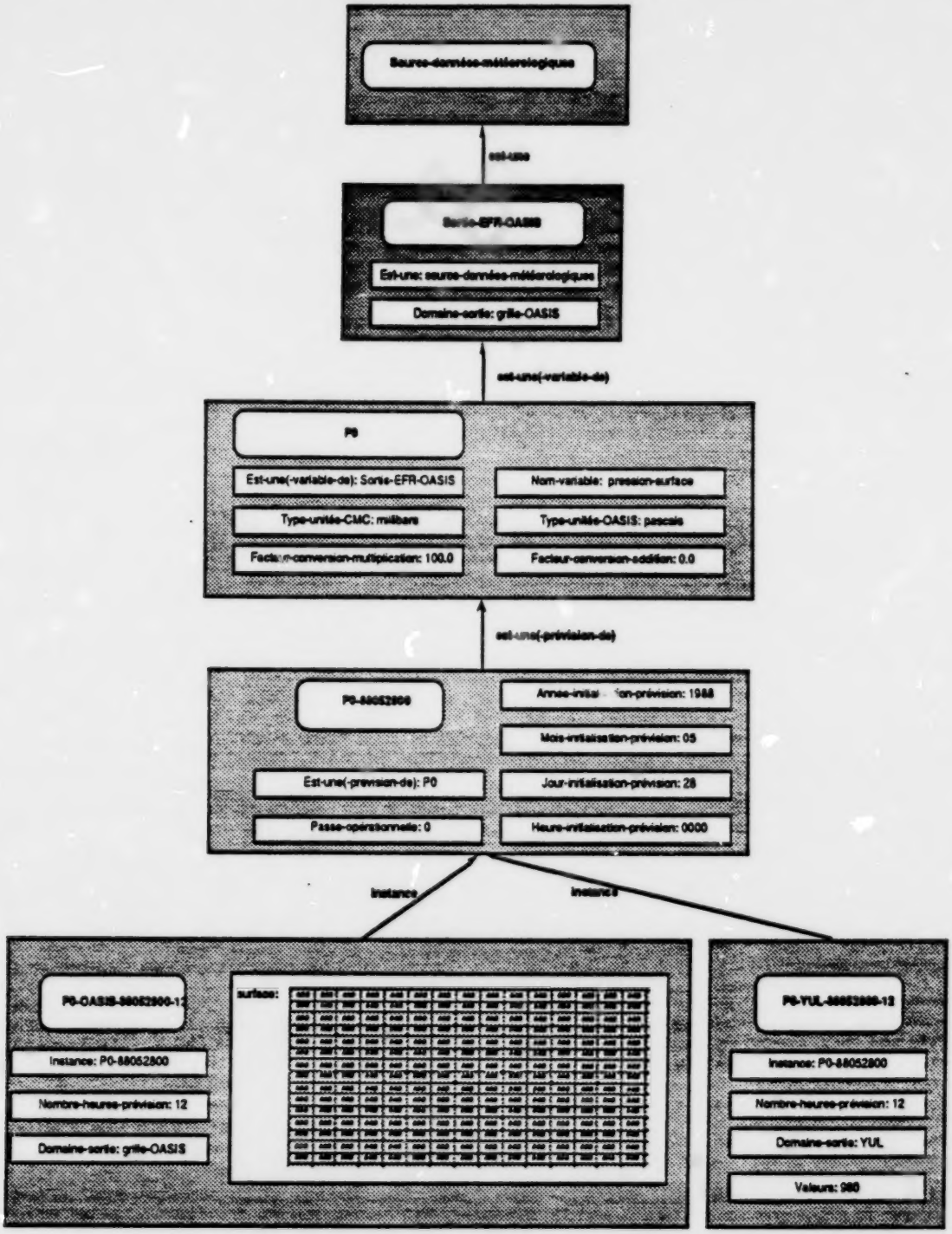



Figure 3.43 Illustration d'une instance de la classe de schémas VARIABLE-HEURE-INITIALE définies pour un point sur la grille

La figure 3.44 montre l'ensemble des schémas formés par la hiérarchie.




.m1.Figure 3.44 Illustration de l'organisation hiérarchique des sorties de schémas implantées dans le prototype

### 3.4.3 Transformation des sorties de modèles en schémas

Comme pour les rapports horaires, il peut être utile de décrire le format dans lequel les sorties du modèle EFR sont disponibles avant de discuter leur transformation en schémas.

#### 3.4.3.1 Format des données brutes

Au Centre météorologique canadien les sorties des sorties numériques sont archivées sur des *fichiers standards RPN*[1]. La structure de ces fichiers permet d'utiliser de façon transparente de nombreux logiciels (interpolateurs de grilles, progiciels graphiques). Les fichiers standards RPN sont des fichiers de type binaire dont la structure interne est très dépendante des ordinateurs sur lesquels ils sont utilisés. La façon la plus simple de transférer les données du CMC au CRIM passait-par la conversion des sorties du modèle sous forme de fichiers de type texte.

La figure 3.45 montre un exemple des sorties brutes du modèle. Cet exemple représente une prévision de 12 heures du champ de la pression à la surface, initialisée le 3 juin 1988 à 00h00 TUC. Ce champ couvre la grille d'OASIS, telle que décrite à la section précédente.

```
    LU(  2)     5 P0 P     0    12     0    15    15    1 FE OPRUN 6060388000
600  72  N  399   80 34376  1524 R16 0000417    59
        0  0  0.93343E+03  0.94444E+03  0.96023E+03  0.97240E+03  0.98009E+03
        0  5  0.98490E+03  0.98887E+03  0.99138E+03  0.99265E+03  0.99301E+03
        0 10  0.99285E+03  0.99230E+03  0.99146E+03  0.99085E+03  0.99125E+03
        1  0  0.92394E+03  0.93152E+03  0.94862E+03  0.96655E+03  0.97856E+03
        1  5  0.98576E+03  0.98932E+03  0.99119E+03  0.99192E+03  0.99224E+03
        1 10  0.99282E+03  0.99396E+03  0.99571E+03  0.99825E+03  0.10011E+04
                                        ...
       13  0  0.10139E+04  0.10144E+04  0.10147E+04  0.10148E+04  0.10145E+04
       13  5  0.10137E+04  0.10122E+04  0.10097E+04  0.10082E+04  0.10083E+04
       13 10  0.10048E+04  0.99305E+03  0.97709E+03  0.96764E+03  0.97330E+03
       14  0  0.10135E+04  0.10138E+04  0.10139E+04  0.10138E+04  0.10133E+04
       14  5  0.10124E+04  0.10108E+04  0.10084E+04  0.10065E+04  0.10059E+04
       14 10  0.10037E+04  0.99518E+03  0.98407E+03  0.97957E+03  0.98543E+03
```

.m1.Figure 3.45 Exemple des sorties brutes du modèle EFR

[1]RPN: Recherche en Prévision Numérique.

Figure 3.45 Exemple des sorties brutes du modèle EFR

Les sorties brutes du modèle EFR utilisées par le prototype ont toutes la même structure. Les deux premières lignes contiennent des paramètres qui déterminent le champ de façon unique. Ces paramètres sont générés automatiquement par les programmes d'interpolation développés par Environnement Canada. Ils ont été utilisés tels quels lors de la transformation en schémas des sorties du modèle, puisqu'ils contiennent déjà toute l'information relative aux champs qui est d'intérêt pour le prototype. Les lignes subséquentes contiennent les valeurs aux points de grille.

### 3.4.3.1.1 Inventaire des descripteurs de la grille

La présente section donne l'inventaire des descripteurs de grille. L'ordre d'apparition des différents paramètres permettant l'identification des champs est illustré à la figure 3.45.

```
LU(  21    70   PO P     0     12    0    15    15    1 FE OPRUN 6060388000
 1   2     3    4  5     6     7     8          9          10         11

600  72  N  399   80 14376  1524 R16 000051B    59
12   13 14    15    16    17
```

Figure 3.46 Structure des descripteurs de champs du modèle

**Paramètre 1: mode d'accès au fichier.**
Ce paramètre indique si on se trouve en mode de lecture (LU) ou d'écriture (ECRIT).

**Paramètre 2: numéro d'unité logique**
Ce paramètre indique l'unité logique du fichier consulté. Il sert de pointeur sur le fichier d'entrée pour charger les sorties du modèle en mémoire.

**Paramètre 3: index du champ dans le fichier**
Ce paramètre est utilisé pour usage interne de l'interpolateur de grilles.

**Paramètre 4: variable météorologique**
Ce paramètre contient un code généralement composé de deux caractères qui définit la variable représentée aux points de grille.

**Paramètre 5: type de champ**

Ce paramètre, composé d'un seul caractère, permet de déterminer la provenance du champ; il peut être issu d'une prévision de modèle ("P") ou d'une analyse objective ("A").

**Paramètre 6: niveau du champ dans l'atmosphère**

Ce paramètre définit le niveau du champ en coordonnées de pression ou σ; les valeurs qu'il peut prendre sont normalement comprises entre 0 et 12000. Le chiffre 0 est utilisé pour les champs de surface. Des valeurs plus grandes que 0 et inférieures ou égales à 1000 indiquent que les coordonnées du champ sont en coordonnées de pression, et la valeur indiquée est la valeur du niveau en millibars. Des valeurs plus grandes que 1000 indiquent que l'on est alors en coordonnées σ; il faut alors soustraire 2000 de la valeur et diviser par 10000 pour obtenir le niveau σ équivalent. Par exemple, un champ ayant comme niveau 11450 correspond au niveau σ = .945 = (11,450 - 2,000) / 10,000 .

**Paramètre 7: nombre d'heures écoulées depuis le temps initial**

Ce nombre est un entier généralement compris entre 0 et 144. L'exemple ci-dessus indique que l'on consulte une prévision de 12 heures.

**Paramètre 8: index libre**

Cet index est utilisé comme clé supplémentaire pour effectuer des expériences avec les modèles.

**Paramètre 9: dimensions x,y et z de la grille**

Ce paramètre définit, dans l'ordre indiqué, la dimension des grille selon chaque axe. Mentionnons que pour les grilles bi-dimensionnelles, la troisième dimension est initialisée à 1.

**Paramètre 10: étiquette du modèle**

Ce paramètre est composé de 8 caractères et permet d'identifier la version du modèle qui a produit le champ consulté. Par exemple, l'étiquette *FE OPRUN* indique que le champ décrit sur ces lignes est la version opérationnelle du modèle EFR (*FE* pour *Finite Element* et *OPRUN* pour *OPerational RUN*).

**Paramètre 11: timbre date-temps**

Ce paramètre indique l'heure de validité d'une analyse ou l'heure d'initialisation d'un modèle. Il se décompose de la façon suivante:

6060388000: ordinal de la semaine, entre 1 et 7.
6060388000: mois de l'année, entre 1 et 12.
6060388000: jour du mois, entre 1 et 31.
6060388000: année, entre 0 et 99.
6060388000: heure synoptique, en temps universel.
6060388000: numéro de la passe opérationnelle.

On peut mentionner que l'index de la passe opérationnelle est surtout utilisé comme indicateur de la fiabilité des analyses. Dans le cycle de 12 heures d'assimilation des données, il y a actuellement 6 passes opérationnelles. Cet index peut donc être utilisé pour identifier à quel moment du cycle opérationnel le modèle a tourné.

**Paramètre 12: durée du pas de temps**

Ce paramètre indique la durée du pas de temps, en secondes, utilisé pour l'intégration du modèle. Dans la présente version du modèle, le pas de temps est de 600 secondes ou 10 minutes. Pour produire une prévision de 36 heures, le modèle doit donc procéder à 6 * 36 = 216 intégrations de 10 minutes.

**Paramètre 13: nombre de pas de temps écoulés depuis le temps initial**

Ce paramètre, multiplié par le pas de temps et converti en heures, donne le nombre d'heures écoulées depuis le temps initial.

**Paramètre 14: type de projection**

Ce paramètre d'un caractère permet de déterminer la projection de la grille: polaire stéréographique ("N"), gaussienne ("G"), ou de Mercator ("M").

**Paramètre 15: coordonnées approximatives y et x du pôle nord sur la grille**

Ces deux paramètres, conjointement avec les paramètres 16 et 17, permettent de situer la grille sur le globe terrestre[1]. Il est à remarquer que ces paramètres sont exprimés en dixièmes de points de grille; dans le cas présent les coordonnées approximatives du pôle sont y=39.9 et x=8.0. La grille commence au point (1,1).

**Paramètre 16: position du méridien de Greenwich sur la grille.**

---

[2] voir annexe II, *Spécifications de la grille utilisée pour OASIS.*
[3] voir annexe II, *Spécifications de la grille utilisée pour OASIS.*

Ce paramètre exprime la différence angulaire entre le méridien de Greenwich et l'axe des X de la grille[1]. Il est ici exprimé en centièmes de degrés; dans le cas présent la rotation de la grille par rapport au méridien de Greenwich est de 343.76°.

**Paramètre 17: pas de grille**

Il s'agit de la distance horizontale entre les points de grille, exprimée en hectomètres. Pour la grille d'OASIS, nous utilisons une projection polaire stéréographique conforme à 60° Nord. La résolution horizontale de la grille doit alors être interprétée comme étant de 152.4 km à 60° Nord.

### 3.4.3.1.2 Structure des données aux points de grille

Les sorties du modèle aux points de grille apparaissent sous la forme illustrée à la figure 3.47, et ont la structure suivante.

index_x index_y pt(x,y) pt(x,y+1) pt(x,y+2) pt(x,y+3) pt(x,y+4)

```
 0   0  0.93343E+03  0.94444E+03  0.96023E+03  0.97240E+03  0.98009E+03
 0   5  0.98490E+03  0.98887E+03  0.99138E+03  0.99265E+03  0.99301E+03
 0  10  0.99285E+03  0.99230E+03  0.99146E+03  0.99085E+03  0.99125E+03
 1   0  0.92394E+03  0.93152E+03  0.94862E+03  0.96655E+03  0.97856E+03
 1   5  0.98576E+03  0.98932E+03  0.99119E+03  0.99192E+03  0.99224E+03
 1  10  0.99282E+03  0.99396E+03  0.99571E+03  0.99825E+03  0.10011E+04
                                    ...
13   0  0.10139E+04  0.10144E+04  0.10147E+04  0.10148E+04  0.10145E+04
13   5  0.10137E+04  0.10122E+04  0.10097E+04  0.10082E+04  0.10083E+04
13  10  0.10048E+04  0.99305E+03  0.97709E+03  0.96764E+03  0.97330E+03
14   0  0.10135E+04  0.10138E+04  0.10139E+04  0.10138E+04  0.10133E+04
14   5  0.10124E+04  0.10108E+04  0.10084E+04  0.10065E+04  0.10059E+04
14  10  0.10037E+04  0.99518E+03  0.98407E+03  0.97957E+03  0.98543E+03
```

Figure 3.47 Structure des valeurs aux points de grille

Par exemple, étant donné la ligne suivante,

```
14    0    0.10135E+04    0.10138E+04    0.10139E+04    0.10138E+04    0.10133E+04
```

nous avons les valeurs aux points de grille:

```
(14,0)=0.10135E+04
```

[1] voir annexe II, *Spécifications de la grille utilisée pour OASIS.*

```
(14,1)=0.10138E+04
(14,2)=0.10139E+04
(14,3)=0.10138E+04
(14,4)=0.10133E+04
```

### 3.4.3.2 Vue d'ensemble des opérations

Comme pour les rapports horaires, la transformation des sorties du modèle EFR s'est effectuée par le biais de programmes écrits en LISP par l'auteur. Ces programmes décodent les sorties de modèle dans des fichiers de type texte, et les archivent ensuite sous forme de schémas. Les étapes du traitement des données sont illustrées à figure 3.47. Les prochaines sections donnent des explications plus détaillées de chacune de ces opérations.

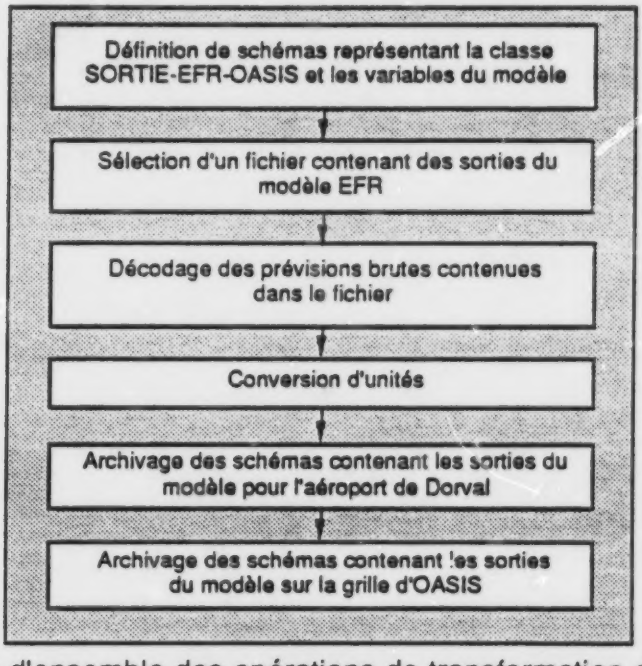



Figure 3.48 Vue d'ensemble des opérations de transformation en schémas des sorties de modèles numériques

### 3.4.3.3 Définition des schémas de la classe VARIABLE

Cette opération vise à définir dans la base de connaissance des schémas qui représentent les variables du modèle utilisées par OASIS, soit les schémas de la classe VARIABLE. Ces schémas, tels que définis à la section 3.4.2.2.2, permettent l'identification des variables

dans les fichiers contenant les sorties brutes du modèle,et définissent les opérations de conversion nécessaires pour convertir les unités des sorties brutes aux unités d'OASIS.

### 3.4.3.4 Sélection d'un fichier contenant des sorties de modèle

Comme pour les rapports horaires, cette opération vise à spécifier aux routines de décodage, par une intervention de l'usager, le nom d'un fichier contenant des sorties de modèles brutes. Cette spécification se fait par un échange question/réponse.

### 3.4.3.5 Décodage

Typiquement les opérations de transformation des sorties du modèle EFR en schémas se font à partir de fichiers contenant les valeurs prévues de 3 variables, pour tous les niveaux σ du modèle, pour 13 périodes de prévision (de 0 à 36 heures par intervalles de 3 heures). Cette restriction de 3 variables vient d'une limite imposée par l'espace-mémoire disponible, puisque tous les schémas représentant les sorties de modèle sont conservés en mémoire avant d'être écrits sur disque. Le processus de décodage est illustré à la figure 3.48.

Le fichier est examiné séquentiellement. Lors de la lecture, toute chaîne de caractères définie entre des espaces ou entre des parenthèses est considérée comme un symbole LISP. Une nouvelle instance de prévision d'une variable du modèle est définie lorsque la fonction de lecture rencontre le symbole LU, comme dans l'exemple ci-dessous.

```
LU(  2)    5 P0 P     0    12    0    15    15    1 FE OPRUN 6060388000 600 72
N  399    80 34376  1524 R16 0000417    59
```

Les descripteurs du champ sont alors lus un à un. Le code identifiant le champ et une partie du timbre date-temps sont alors concaténés pour former un symbole définissant la classe représentant l'ensemble des prévisions d'une variable initialisées à un temps t.

Dans l'exemple énoncé ci-dessus, nous aurions comme valeurs:

- le code identifiant le champ: P0
- le timbre date-temps: 88060300

qui formeraient le symbole P0-88060300. Ce symbole représente donc la classe des champs prévus de la pression à la surface dont le temps initial correspond au 3 juin 1988 à 00h00 TUC.

Knowledge Craft fournit certains utilitaires qui permettent de vérifier si un schéma est défini ou non dans la base de faits. Nous pouvons ainsi vérifier si une classe du type mentionné ci-dessus existe. Si le schéma représentant cette classe n'existe pas, on le définit en utilisant le nom du schéma et on initialise les paramètres temporels à partir du timbre date-temps. Si le schéma existe, on ne fait rien.

La prochaine étape consiste à définir l'instance de la prévision de la variable, qui est caractérisée par le nombre d'heures écoulées depuis le temps initial. On définit cette instance en concaténant le nom de la variable, le symbole "OASIS", une partie du timbre date-temps représentant l'heure initiale et l'heure de prévision. Avec l'exemple décrit précédemment, l'instance de la prévision de 12 heures de la pression à la surface initialisée le 3 juin 1988 à minuit TUC serait définie par le symbole P0-OASIS-88060300-12. Comme pour le symbole précédent, on vérifie l'existence du schéma. Si le schéma n'existe pas, il est créé.

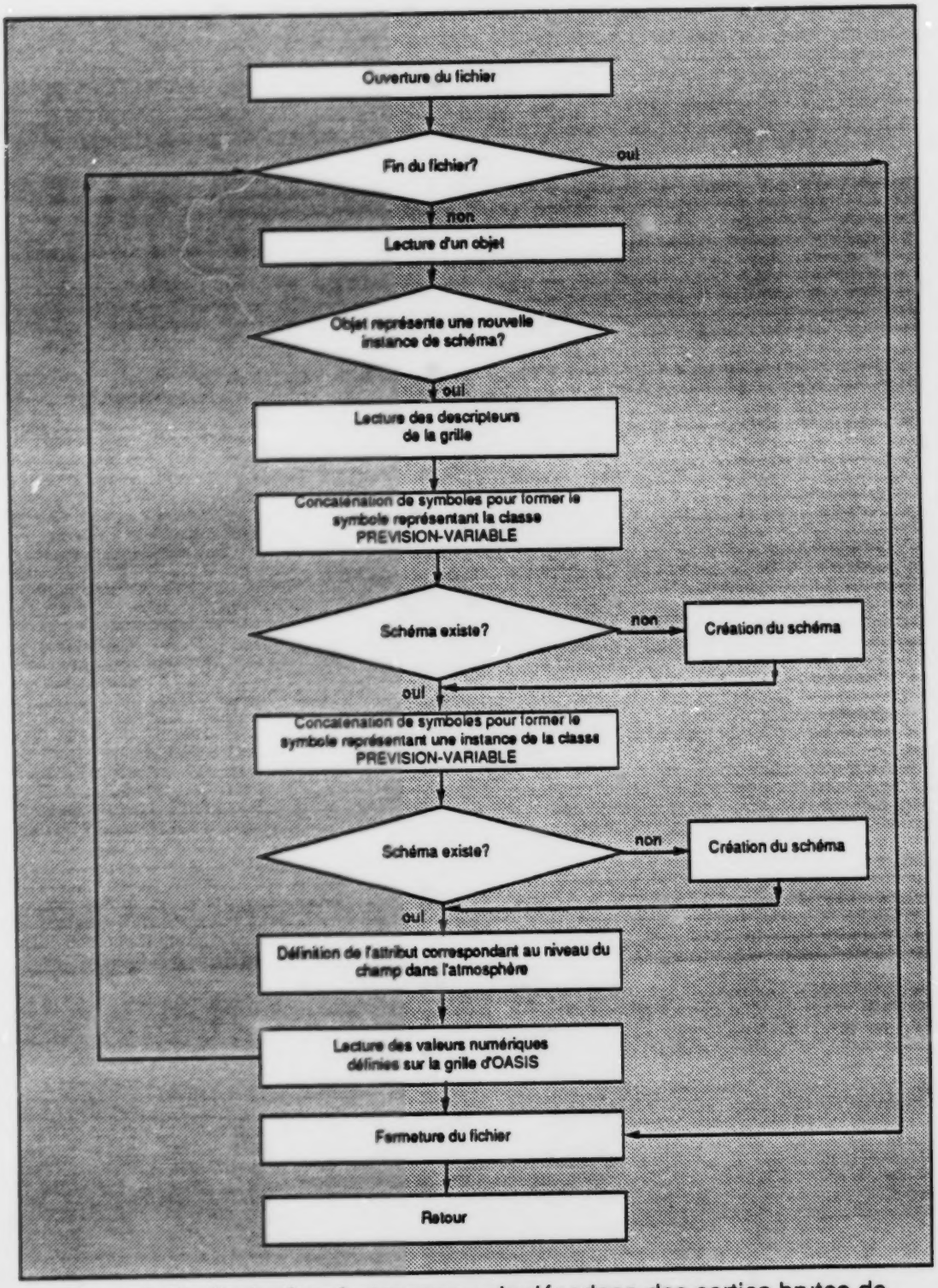



Figure 3.49 Illustration du processus de décodage des sorties brutes de modèles

La dernière étape consiste à identifier le niveau du champ que l'on s'apprête à lire, à l'aide des règles décrites à la section 3.4.3.1.1 (paramètre 6, niveau du champ dans l'atmosphère) pour définir les niveaux.

- Si le niveau du champ est 0, alors c'est un champ de surface
- Si le niveau du champ est >0 et ≤1000, alors c'est un champ exprimé en coordonnées de pression
- Si le niveau du champ est >1000, alors c'est un champ exprimé en coordonnées σ.

Donc, dépendant du type de niveau, on définira au symbole

- un attribut SURFACE si le niveau est à la surface,
- un attribut "niveau"-MB pour un champ exprimé en coordonnées de pression (MB étant l'abréviation usuelle de millibar), où "niveau" peut prendre une valeur normalement comprise entre 50 et 1000,
- un attribut "niveau"-SIGMA pour un champ exprimé en coordonnées sigma, où "niveau" peut prendre une valeur normalement comprise entre 0.05 et 1.00.

Une fois ces attributs définis, il ne reste qu'à initialiser les valeurs du champ en lisant dans le fichier les valeurs aux points de grille. Le processus de définition des schémas se répète jusqu'à ce qu'on ait atteint la fin du fichier. La prochaine étape consiste ensuite à convertir les unités des schémas dans les unités désirées pour OASIS.

### 3.4.3.6 Conversion d'unités

Pour chaque schéma, nous pouvons obtenir, par héritage hiérarchique des attributs de la classe VARIABLE, les facteurs de conversion nécessaires pour une variable donnée. La conversion se fait en multipliant ou en additionnant les points de grille définis dans les attributs par le facteur de conversion approprié. Le tableau 3.7 montre les opérations de conversion pour les différentes variables du modèle utilisées par le prototype

| Code | Description | Unités originales | Unités OASIS |
|---|---|---|---|
| GZ | Hauteur du géopotentiel | décamètres | mètres |
| TT | Température | ℃ | ℃ |
| P0 | Pression à la surface | millibars | Pascals |
| PN | Pression au niveau de la mer | millibars | Pascals |

Tableau 3.9 Conversion d'unités pour les variables du modèle

### 3.4.3.7 Définition des schémas représentant les sorties du modèle pour l'aéroport de Dorval

La création des schémas contenant les sorties du modèle EFR pour l'aéroport de Dorval se fait par l'extraction de la valeur au point (x=7, y=7) de la (ou des) grille(s) de chaque schéma contenant les sorties du modèle sur la grille d'OASIS. Tel que mentionné à la section 3.4.2.2.4, la valeur représentée dans chaque instance de schéma peut contenir une ou plusieurs valeurs, selon que le champ est défini en surface ou en altitude.

### 3.4.3.8 Archivage

Comme pour les rapports horaires, l'archivage des schémas contenant les sorties du modèle EFR se fait en utilisant le gestionnaire de sauvegarde. Présentement, les sorties du modèle sont archivées sous deux formats, correspondant aux deux types d'instances de la classe VARIABLE-TEMPS-INITIAL, décrites à la section 3.4.2.2.4, qui sont implantées dans le prototype.

Ces instances contiennent les prévisions du modèle définies pour la grille d'OASIS et pour l'aéroport de Dorval. Présentement, ces deux types d'instances sont archivés dans des fichiers distincts. Chaque fichier contient toutes les prévisions des variables pour l'ensemble de la période d'intégration, soit de 0 à 36 heures par intervalles de 3 heures. Les schémas de la classe VARIABLE-TEMPS-INITIAL, qui regroupent l'ensemble des instances de prévision de chaque variable, sont archivées dans chacun des fichiers.

Les figures 3.49 et 3.50 montrent comment sont archivés dans les fichiers les schémas représentant les instances de la classe **VARIABLE-TEMPS-INITIAL** définies respectivement pour l'aéroport de Dorval et pour la grille d'OASIS.

```
(DEFSCHEMA P0-YUL-88060300-12 :PARALLEL :NOTIFY :CONTEXT $ROOT-CONTEXT
          (INSTANCE P0-88060300) (NOMBRE-HEURES-PREVISIONS 12)
          (DOMAINE-SORTIE YUL) (VALEURS 96433.0))
```

Figure 3.50 Exemple de schéma représentant les sorties du modèle pour l'aéroport de Dorval

```
(DEFSCHEMA PO-OASIS-88060300-12 :PARALLEL :NOTIFY :CONTEXT $ROOT-CONTEXT
           (INSTANCE PO-88060300) (NOMBRE-HEURES-PREVISIONS 12)
           (DOMAINE-SORTIE GRILLE-OASIS)
           (SURFACE
            #2A((93343.0 94444.0 96023.0 97240.0 98009.0 98490.0 98887.0
                 99138.0 99265.0 99301.0 99285.0 99230.0 99146.0 99085.0
                 99125.0)
                (92394.0 93152.0 94862.0 96655.0 97856.0 98576.0 98932.0
                 99119.0 99192.0 99224.0 99282.0 99396.0 99571.0 99825.0
                 100110.0)
                (92419.0 91888.0 93106.0 95201.0 97256.0 98493.0 99033.0
                 99140.0 99111.0 99138.0 99307.0 99659.0 100150.0 100690.0
                 101170.0)
                (93912.0 92251.0 92177.0 93861.0 96109.0 97833.0 98744.0
                 98970.0 98936.0 98996.0 99320.0 99904.0 100640.0 101390.0
                 101910.0)
                (96930.0 94962.0 93805.0 93996.0 95115.0 96518.0 97560.0
                 98129.0 98372.0 98623.0 99070.0 99769.0 100640.0 101460.0
                 102020.0)
                (99639.0 98218.0 96644.0 95394.0 95004.0 95371.0 96201.0
                 96984.0 97560.0 97954.0 98344.0 98901.0 99644.0 100430.0
                 101040.0)
                (100910.0 100310.0 98983.0 97308.0 95949.0 95390.0 95651.0
                 96404.0 97094.0 97456.0 97530.0 97599.0 97909.0 98449.0
                 99051.0)
                (101320.0 101180.0 100430.0 99031.0 97395.0 96168.0 95852.0
                 96433.0 97250.0 97642.0 97283.0 96321.0 95775.0 95918.0
                 96706.0)
                (101390.0 101450.0 101190.0 100340.0 98936.0 97384.0 96559.0
                 96786.0 97669.0 98447.0 97729.0 95842.0 94127.0 93704.0
                 94542.0)
                (101390.0 101500.0 101530.0 101240.0 100340.0 98997.0 97950.0
                 97693.0 98503.0 99438.0 98989.0 96700.0 94292.0 92930.0
                 93164.0)
                (101400.0 101500.0 101610.0 101620.0 101260.0 100570.0 99794.0
                 99424.0 99774.0 100580.0 100220.0 98228.0 95581.0 93486.0
                 92950.0)
                (101420.0 101500.0 101590.0 101640.0 101600.0 101380.0 101090.0
                 100730.0 100760.0 101070.0 100680.0 99024.0 96597.0 94523.0
                 94099.0)
                (101420.0 101490.0 101540.0 101570.0 101550.0 101500.0 101320.0
                 101050.0 100940.0 101020.0 100630.0 99195.0 97205.0 95727.0
                 95931.0)
                (101390.0 101440.0 101470.0 101480.0 101450.0 101370.0 101220.0
                 100970.0 100820.0 100830.0 100480.0 99305.0 97709.0 96764.0
                 97330.0)
                (101350.0 101380.0 101390.0 101380.0 101330.0 101240.0 101080.0
                 100840.0 100650.0 100590.0 100370.0 99518.0 98407.0 97957.0
                 98543.0))))
```

Figure 3.51 Exemple de schéma représentant les sorties du modèle pour la grille d'OASIS

# Chapitre IV

# Description du prototype

## 4.1 Environnement informatique

Le prototype d'OASIS est implanté sur une station de travail VAXStation II GPX de la compagnie DIGITAL, tournant sous le système d'exploitation VMS. Le prototype a été rédigé en VAX LISP, une implémentation dérivée de COMMON LISP, à l'aide de la coquille de développement Knowledge Craft. Knowledge Craft est un sur-ensemble de LISP, spécialement dédié au développement de systèmes experts. Knowledge Craft supporte aussi les langages de programmation PROLOG et OPS-5. En plus du VAXStation, nous avons aussi utilisé le VAX 8650 du CRIM pour le traitement préliminaire des données brutes. Knowledge Craft est aussi disponible sur le VAX 8650.

## 4.2 Architecture

L'architecture du prototype repose sur l'implantation d'un tableau noir (de l'anglais *blackboard*), développé par le CRIM dans le cadre du projet CRIM/CAE (un système expert pour le contrôle des simulateurs de vol). Waterman [Waterman, 86] définit un tableau noir comme étant une base de données centrale, utilisée pour contrôler et coordonner l'opération de groupes de règles indépendants entre eux. Ces groupes de règles sont communément appelées "sources de connaissance" (de l'anglais *knowledge sources*). Les sources de connaissances peuvent communiquer entre elles par le biais de messages qu'elles s'envoient mutuellement.

Ce type d'architecture a été utilisé la première fois vers le milieu des années 1970, dans HEARSAY-II, un système pour la reconnaissance de la parole. Ce système a conduit au développement de HEARSAY-III, un langage d'ingénierie de la connaissance pour le contrôle de multiples sources de connaissances.

Les sources de connaissances peuvent être représentées sous forme de règles, de schémas, d'assertions logiques ou de procédures. Ces sources peuvent représenter des connaissances

factuelles concernant les objets du domaine, des modèles d'objets du domaine, ou des méthodes pour obtenir les caractéristiques de l'objet du domaine.

Une description complète du tableau noir utilisé par OASIS dépasserait le cadre de ce document. Le lecteur intéressé pourra consulter [Mailloux, 87] et [Macoosh, 88] pour de plus amples renseignements.

## 4.3 Règles

Les règles utilisées par OASIS sont le produit d'une méthode descendante d'organisation de la connaissance [Cotnoir et Zwack, 88]. Selon cette démarche, la production de règles pour la prévision passe par les étapes suivantes:

- la compréhension des conditions physiques qui produisent les nuages bas,
- l'identification des paramètres physiques permettant la prévision de l'étendue, de la base et du sommet des nuages bas,
- le développement de règles permettant l'utilisation de ces paramètres.

Les règles développées tiennent compte du raisonnement analytique que tout météorologiste expérimenté devrait appliquer lorsqu'il produit une prévision, en supposant que les contraintes de temps et de matériel sont inexistantes.

Ces règles sont organisées sous forme de schémas, qui peuvent contenir différents attributs, et dont l'ensemble forme une hiérarchie. La structure des schémas présentés au chapitre III du présent document est d'ailleurs inspirée de celle utilisée dans [Cotnoir et Zwack, 88]. Ces schémas représentent des concepts météorologiques pertinents à la prévision de nuages bas. La figure 4.1 illustre un exemple de l'organisation hiérarchique de la connaissance des phénomènes physiques causant les nuages bas [Cotnoir, 88].

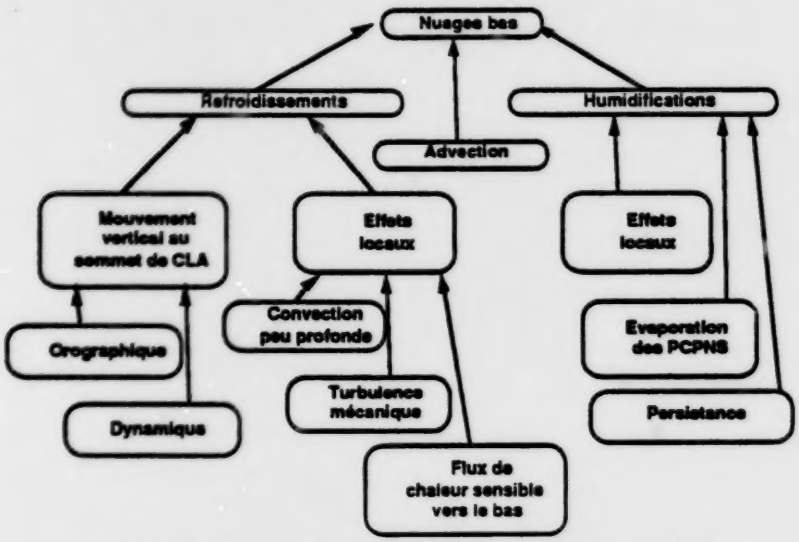



Figure 4.1 Organisation hiérarchique de la connaissance des phénomènes physiques causant les nuages bas (tiré de [Cotnoir, 88])

La description détaillée des règles définies pour OASIS est documentée dans [Cotnoir, 88]. Il peut être cependant intéressant de donner un aperçu de la structure de la base de connaissances pour mieux cerner l'utilisation des données météorologiques par le prototype.

L'approche utilisée par [Cotnoir et Zwack, 88] est de classifier les nuages en deux catégories: les nuages de type cumuliforme, (produits en atmosphère turbulente) et les nuages de type stratiforme (produits en atmosphère non-turbulente). L'atmosphère turbulente, ou couche limite, est la partie de l'atmosphère qui est la plus influencée par la topographie. L'épaisseur de cette couche peut connaître de grandes variations, dues aux effets conjoints de plusieurs éléments comme le réchauffement diurne, la rugosité du terrain, la force du vent, etc. Dans le prototype, ce problème a été simplifié en fixant à 510 mètres la hauteur de cette couche turbulente.

Pour prévoir l'étendue des nuages bas pour les nuages se trouvant dans la couche limite turbulente, il faut connaître les éléments suivants:

- le profil vertical de la température
- le profil vertical du point de rosée
- l'intensité de la turbulence (principalement fonction du vent et du profil vertical de température)
- le mouvement vertical au sommet de la couche limite
- la stabilité de l'air (fonction de la température).

Dans la couche limite non turbulente, ces éléments sont les mêmes sauf l'intensité de la turbulence et la stabilité de l'air, dont la présence n'est pas nécessaire.

Pour prévoir la base et le sommet des nuages, il faut connaître l'humidité relative de l'air, qui est fonction des profils verticaux de la température de l'air, de la température du point de rosée et de la pression ambiante.

Certains de ces paramètres sont catégorisés selon certaines valeurs typiques. Par exemple, le mouvement vertical est divisé en quatre catégories (nul, faible, modéré, fort). Il en va de même de l'humidité, qui est catégorisée selon des valeurs de point de rosée. D'autres éléments ont des valeurs de défauts, en attendant une représentation plus adéquate. C'est le cas de la hauteur de la couche limite, qui est fixée à 510 mètres dans le prototype.

La catégorisation de ces différents éléments a permis de définir, entre autres, 126 règles de prévision de l'étendue des nuages bas dans la couche limite atmosphérique (CLA). Ces règles peuvent se présenter sous une forme tabulaire; dont un court extrait est montré à la figure 4.2. Ces règles expriment une résolution de problème par chaînage avant; où les antécédents doivent être évalués avant de porter une conclusion.

| Mouvement vertical CL Pa/s | | | | Turb. méc./conv. mètres | | | T - Td | | Stabilité au-dessus de la CLA E-3 °K/m | | | ETENDUE | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nul | Faib. | Mod. | Fort | Faib. | Mod. | Fort | | | Faib. | Mod. | Fort | | | | | | |
| 0 | ≤0.25 | ≤0.50 | >0.50 | <250 | <500 | ≥500 | ≤1 | ≤2 | ≤-3 | ≤0 | >0 | OVC | BKN | BKN O SCT | BKN V SCT | SCT O BKN | SCT/CLR |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | ASC. | | | X | | | X | | X | | | | | | | X | |
| | | ASC. | | X | | | X | | X | | | | | | X | | |
| | | | ASC. | X | | | X | | X | | | | | X | | | |
| X | | | | X | | | X | | X | | | | | | | | X |
| | DESC | | | X | | | X | | X | | | | | | | | X |
| | | DESC | | X | | | X | | X | | | | | | | | X |
| | | | DESC | X | | | X | | X | | | | | | | | X |
| | ASC. | | | | X | | X | | X | | | | | | X | | |
| | | ASC. | | | X | | X | | X | | | | | X | | | |
| | | | ASC. | | X | | X | | X | | | | X | | | | |
| X | | | | | X | | X | | X | | | | | | | X | |
| | DESC | | | | X | | X | | X | | | | | | | | X |
| | | DESC | | | X | | X | | X | | | | | | | | X |
| | | | DESC | | X | | X | | X | | | | | | | | X |
| | ASC. | | | | | X | X | | X | | | | | X | | | |
| | | ASC. | | | | X | X | | X | | | | X | | | | |
| | | | ASC. | | | X | X | | X | | | X | | | | | |
| X | | | | | | X | X | | X | | | | | | X | | |
| | DESC | | | | | X | X | | X | | | | | | | X | |

Figure 4.2 Présentation tabulaire de règles utilisées pour la prévision de l'étendue de nuages bas dans la couche limite turbulente

La première rangée de la figure 4.2 peut être interprétée de la façon suivante:

A une hauteur donnée dans la couche limite atmosphérique (CLA):

si le mouvement vertical dans la couche limite est ASCENDANT et de FAIBLE INTENSITÉ (colonne "Mouvement vertical CL"),

et si la turbulence mécanique ou convective est FAIBLE (colonne "Turb. méc. conv."),

et si la dépression du point de rosée est plus petite ou égale à 1 °C (colonne "T-TD")

et si la stabilité de l'air au dessus de la couche limite est FAIBLE, (colonne "Stabilité au-dessus de CLA")

alors la couverture de nuages sera SCT OCNL BKN, c'est à dire comprise entre 10 et 50% de la voûte céleste, mais pouvant aussi aller entre 60 et 90% de la voûte céleste durant de brèves périodes (colonne "Étendue").

Ces règles sont essentiellement diagnostiques. Pour produire une prévision pour un temps allant de t à t+$\Delta$t, elles exigent que soient connues les valeurs de tous ces paramètres durant cette période. Dans l'état actuel du prototype, ces paramètres sont directement initialisées à partir des sorties du modèle EFR, disponibles pour le point de grille au dessus de l'aéroport de Dorval.

## 4.4 Production d'une prévision de nuages bas

La production d'une prévision de nuages bas est déclenchée par l'usager d'OASIS, au moyen d'une commande simple. OASIS demande alors à l'usager de lui donner le nom des fichiers qui contiennent les rapports horaires et les sorties du modèle EFR pour l'aéroport de Dorval. Ces données sont déjà transformées en schémas par le biais des routines décrites au chapitre III. Ici s'arrête l'intervention de l'usager jusqu'à l'affichage de la prévision.

Une fois que les schémas contenant les données météorologiques sont chargés en mémoire, OASIS procède à différentes interpolations dans la verticale et dans le temps. Les interpolations dans la verticale se font pour toutes les variables du modèle, à toutes les 3 heures, du temps initial à 24 heures. Les interpolations se font à partir des sorties du modèle définies aux niveaux standards de pression (1000, 850 et 700 mb) vers des niveaux de hauteurs fixes. Ces niveaux sont définis:

- à tous les 30 mètres, de la surface à 450 mètres
- à tous les 150 mètres, de 450 à 900 mètres
- à tous les 300 mètres, de 900 à 2100 mètres.

Ces niveaux ont été choisis d'après les exigences d'Environnement Canada [MANAIR, 85], concernant le format des prévisions de type FT. Ces exigences stipulent que la hauteur des nuages doit être prévue à une résolution de 100 pieds (30 mètres) si la base des nuages se situe sous 1500 pieds (450 mètres), à une résolution de 500 pieds (≈150 mètres) si cette base se situe entre 1500 pieds (≈450 mètres) et 3000 pieds (≈900 mètres), et à tous les 1000 pieds (300 mètres) au dessus de cette limite. La prochaine étape consiste à interpoler dans le temps les différents profils verticaux obtenus, de façon à rendre disponibles les valeurs des différentes variables à toutes les heures au lieu d'à toutes les trois heures.

Les valeurs des différentes variables météorologiques disponibles sont ensuite utilisées pour initialiser les différents paramètres physiques de la base de connaissances. En appliquant les règles sur ces paramètres définis à toutes les heures, il est possible de générer un ensemble de 24 prévisions de hauteurs et d'étendue de nuages bas, pour chaque heures comprise entre t-0 et t+24. Ces prévisions individuelles de 24 heures sont ensuite concaténées de façon à obtenir une prévision de type FT conforme aux normes de MANAIR.

# Chapitre V

# Présentation des résultats

Dans ce document, la présentation des résultats se résumera à une étude de cas détaillée d'une prévision de nuages bas produite par OASIS. Nous mettrons l'emphase sur l'analyse des données utilisées par le prototype plutôt que sur une analyse détaillée de la qualité de la prévision.

Une analyse détaillée de la qualité de la prévision serait prématurée à cette étape de développement du prototype. D'abord, OASIS n'a été testé que sur trois cas, ce qui est nettement insuffisant pour espérer tirer des conclusions sur sa valeur. Pour cette fin, il faudrait considérer plusieurs centaines de cas. Ensuite, les performances du prototype dépendent entièrement des performances du modèle numérique utilisé. Si le modèle dévie grandement de la réalité, on peut s'attendre à ce que les prévisions d'OASIS en fassent autant. Juger de la qualité des prévisions d'OASIS reviendrait donc à juger la qualité du modèle lui-même. La base de connaissances d'OASIS est en cours de développement et devra être considérablement élargie pour espérer atteindre des résultats d'une grande précision. Finalement, la validation des règles était encore en cours au moment de la rédaction de ce document; il est possible que les résultats présentés dans [Cotnoir,88] soient légèrement différents de ceux présentés dans ce document si des problèmes sont rencontrés lors de la validation du code.

La stratégie adoptée pour l'évaluation du prototype est de considérer les sorties du modèle, pour le point de grille situé au dessus de l'aéroport de Dorval, comme représentant la réalité. Les configurations de nuages prévues par OASIS seront considérées valables si elle peuvent être comparables à celles que produiraient des météorologistes expérimentés qui n'auraient accès qu'aux mêmes données.

## 5.1 Présentation du cas étudié

Le cas présenté dans ce document est une prévision, faite par OASIS, de la hauteur et de la couverture des nuages bas pour l'aéroport de Dorval, pour une période de 24 heures. Le

temps initial de la prévision est le 3 juin 1988 à 00h00 TUC, correspondant au 2 juin 1988 à 20h00 heure locale de Montréal.

Les données utilisées pour cette prévision consistent en un sous-ensemble des sorties du modèle EFR, pour le point de grille situé au-dessus de l'aéroport de Dorval. Les sorties du modèle utilisées sont définies sur les niveaux standards de pression 1000, 850, 700 et 500 millibars et sont disponibles à toutes les 3 heures pour une période allant de 0 à 24 heures. Les rapports horaires émis par l'aéroport de Dorval ont aussi été utilisés pour fins de vérification.

Dans les prochaines sections nous allons présenter l'ensemble des conditions météorologiques qui prévalaient durant la période de prévision. Ces conditions seront présentées sous une perspective régionale d'abord, puis locale ensuite. Nous allons ensuite examiner les prévisions d'OASIS en fonction de ces conditions.

## 5.2 Analyse de la situation météorologique à une échelle régionale

Les figures 5.1 à 5.13 présentent un ensemble de cartes météorologiques qui montrent les prévisions du modèle EFR sur la grille d'OASIS. Chaque figure montre les prévisions du modèle, pour une période allant de 0 à 24 heures par intervalles de 3 heures.

### 5.2.1 Analyse des champs de pression au niveau de la mer

La figure 5.1 montre l'évolution du champ de pression au niveau de la mer durant la période de 24 heures. L'élément dominant de la carte est une crête de haute pression, orientée nord-ouest/sud-est et traversant travers l'État de New-York, qui s'intensifie lentement durant la période. On remarque aussi un creux orienté est-ouest, traversant l'île d'Anticosti, qui s'intensifie lentement durant la période. La configuration du champ de pression montre que l'aéroport de Dorval reste dans une zone diffluente tout au long de la période. Du point de vue des systèmes météorologiques en présence, ce cas montre une situation stable, caractérisée par des systèmes qui évolue lentement dans le temps.

### 5.2.2 Analyse des champs de hauteur du géopotentiel

Les figures 5.2, 5.3 et 5.4 montrent l'évolution des champs de la hauteur du géopotentiel à 1000, 850 et 700 mb durant la période d'intégration. La configuration des champs de hauteur du géopotentiel à 1000 et 850 mb montrent une structure et une évolution comparables à celles des champs de pression. La crête de l'État de New-York et le creux de l'île d'Anticosti montrent le même patron. L'axe de la crête à 850 mb est situé un peu plus au sud de celui à 1000 mb.

La configuration de ce champ à 700 mb montre une structure un peu différente. L'élément dominant de la carte est un vaste creux évasé, dont l'axe s'étend de la Nouvelle-Écosse jusqu'au lac Ontario, et qui pivote lentement vers le sud durant la période. On remarque aussi le développement d'une faible crête, sur le sud de l'Ontario, qui se développe derrière le creux.

La configuration des champs montre que la région de Montréal demeure dans une zone diffluente, sous l'influence d'une faible circulation du nord-ouest, durant la totalité de la période.

### 5.2.3 Analyse des champs de température

Les figures 5.5, 5.6 et 5.7 montrent l'évolution des champs de température à 1000, 850 et 700 mb durant la période d'intégration. La configuration des isothermes à 1000 mb demeure relativement stationnaire durant l'intégration. Parmi les éléments dominants nous retrouvons deux crêtes. La première crête est située dans le tiers gauche de la carte, la seconde s'étend du sud-ouest de la carte vers la vallée du St-Laurent. On remarque aussi un creux dans les isothermes qui longe la côte atlantique. On remarque une légère baisse des températures entre 00H00 et 12H00, probablement causée par une simulation du refroidissement nocturne dans le modèle (cette période s'étend de 20 heures à 8 heures le matin heure de Montréal).

A 850 mb la crête dans les isothermes qui s'étend sur la vallée du St-Laurent est toujours en évidence mais se résorbe entre 00H00 et 12H00 et demeure stationnaire par la suite.

A 700 mb la crête de la vallée du St-Laurent n'est pas apparente. L'élément dominant de la région est un vaste creux dans les isothermes, situé initialement au nord de la vallée du St-

Laurent et qui dérive lentement vers le sud durant la période. Pour la région de Montréal, l'évolution des isothermes montre un refroidissement des températures durant les 12 premières heures de la prévision, suivi d'un réchauffement graduel des températures à mesure que l'axe du creux des isothermes descend vers le sud.

Une moyenne des trois champs pour la région de Montréal montre que l'élément le plus significatif de ces cartes est un refroidissement des températures durant la première moitié de la période, puis à un réchauffement par la suite, qui se fait plus lentement à 850 mb qu'aux deux autres niveaux.

### 5.2.4 Analyse des champs de dépression du point de rosée

Les figures 5.8, 5.9 et 5.10 montrent l'évolution des champs de dépression du point de rosée à 1000, 850 et 700 mb durant la période d'intégration. Tel que mentionné à la section 3.4.1.3, la dépression du point de rosée est un indicateur de l'humidité de l'air. Plus cette valeur est faible, plus l'air est humide. Par exemple, dans les règles d'OASIS, les nuages ne peuvent se manifester que lorsque la dépression du point de rosée est plus petite ou égale à 2 °C.

En se basant sur cette règle, et en analysant les cartes de ce champ à 1000 mb, on peut conclure qu'il n'y a pas de nuages à ce niveau. Les valeurs minimales que l'on peut identifier sur les cartes sont de l'ordre de 4 °C. On peut noter la présence d'un noyau d'air sec, au sud du lac Érié, qui demeure quasi-stationnaire durant la période d'intégration. Comme pour la température, ce champ semble être soumis à un cycle diurne, avec une baisse des valeurs entre 00H00 et 12H00 TUC et une augmentation entre 12H00 et 24H00. On peut remarquer aussi que de l'air très sec envahit le sud-ouest des régions vers la fin de la période.

A 850 mb, l'élément dominant de la carte est une vaste région d'air humide (la dépression du point de rosée est de moins de 2 °C) sur le centre sud du Québec, dont la superficie grandit constamment entre 00H00 et 15H00, pour ensuite demeurer stationnaire. On peut aussi remarquer que la zone maximum d'humidité dérive lentement vers le sud. Une analyse des conditions sur la région de Montréal montre que la dépression du point de rosée demeure moins de 2 °C durant toute la période d'intégration; ceci peut nous amener à conclure une forte probabilité de la présence de nuages à ce niveau.

A 700 mb, on remarque une zone maximum d'humidité, située au dessus des Laurentides au temps initial, qui se déplace lentement vers le sud durant période d'intégration. La zone maximum d'humidité passe très près de la région de Montréal entre 03H00 et 09H00; une poussée d'air sec assèche l'air graduellement après cette période. De ces cartes, on peut inférer que l'humidité dans la région de Montréal, à ce niveau, est élevée entre 00H00 et 12H00; après cette période l'air s'assèche graduellement.

En résumé, pour la région de Montréal, nous avons un noyau d'air humide qui persiste à 850 mb durant toute la période; on peut donc s'attendre à observer des nuages à ce niveau. Si on fait une moyenne de l'humidité dans la verticale, on constate une humidification maximale entre 06H00 et 12H00, suivie d'un assèchement graduel venant à la fois de la surface et des couches de l'atmosphère situées entre 850 et 700 mb.

### 5.2.5 Analyse des champs de mouvement vertical

Les figures 5.11, 5.12 et 5.13 montrent l'évolution des champs mouvement vertical à 1000, 850 et 700 mb durant la période d'intégration. Tel que mentionné à la section 3.4.1.3, le mouvement vertical est un bon indicateur de la tendance de l'étendue de nuages; de l'air descendant aura tendance à dissiper les nuages, alors que de l'air ascendant aura tendance à accroître leur présence. Puisque ce paramètre indique la variation de la pression dans le temps, une valeur négative sera associée à de l'air ascendant (la pression baisse avec l'altitude), et une valeur positive, avec de l'air ascendant. Dans OASIS, quatre intensités de mouvement vertical sont définies ainsi dans [Cotnoir et Zwack, 88] et figurent dans le tableau 5.1.

| | | |
|---|---|---|
| **nul** | si | $\|\omega\| = 0$ |
| **faible** | si | $\|\omega\| <= 2.5$ µbars/seconde |
| **modéré** | si | 2.5 µbars/seconde $< \|\omega\| <= 5.0$ µbars/seconde |
| **fort** | si | $\|\omega\| > 5.0$ µbars/seconde |

Tableau 5.1 Intensités de mouvement vertical définies dans OASIS

L'analyse des cartes de mouvement vertical aux trois niveaux standards montrent que l'intensité du mouvement vertical est généralement de faible intensité partout sur la grille

d'OASIS, sauf aux niveaux 850 et 700 mb, entre 18H00 et 24H00, où de fortes valeurs de mouvement ascendant sont observées au sud du domaine.

Les cartes de la figure 5.11 montrent que la configuration de ce champ, à 1000 mb, demeure stationnaire. Dans la région de Montréal, les valeurs du mouvement vertical demeurent légèrement négatives. A 850 mb, on remarque que la région où l'air est ascendant a tendance à se résorber graduellement vers le sud durant l'intégration. Le même phénomène se produit à 700 mb. En résumé, pour la région de Montréal, l'air est légèrement ascendant (favorisant la formation de nuages) entre 00H00 et 09H00 et devient légèrement descendant (favorisant la dissipation des nuages) après cette période.

## 5.3 Analyse de la situation météorologique à l'aéroport de Dorval

Les figures 5.14 à 5.23 montrent des profils de la température, de la température du point de rosée et du mouvement vertical en fonction du temps. Ces graphiques permettent d'analyser à une échelle plus locale les sorties du modèle pour le point de grille correspondant à l'aéroport de Dorval. Les sorties du modèle sont disponibles pour 3 points dans la verticale, qui correspondent aux niveaux de pression standards 1000, 850 et 700 mb. La hauteur de ces niveaux dans l'atmosphère est donnée par la hauteur du géopotentiel. La figure 5.24 montre l'évolution de la température et de la température du point de rosée dans le temps, pour les 3 niveaux standards. La figure 5.25 montre l'évolution du mouvement vertical dans le temps, aussi pour les 3 niveaux standards.

### 5.3.1 Analyse des profils de température et d'humidité

Au moyen des mêmes règles que celles utilisées par OASIS, les profils des figures 5.14 à 5.23 permettent d'estimer visuellement la base et le sommet des couches de nuages en se basant sur l'écart entre la température et la température du point de rosée. La variation de cet écart dans le temps est plus visible à la figure 5.24. Nous nous contenterons ici d'une analyse sommaire de ces profils verticaux. Une analyse détaillée peut être consultée dans [Cotnoir, 88].

Les profils et les séries temporelles confirment ce que l'on pouvait inférer des cartes définies sur la grille d'OASIS. La dépression du point de rosée à 1000 mb demeure

relativement constante dans le temps. A 850 mb, en utilisant le seuil de 2 °C pour la confirmer la présence de nuages, on peut inférer la présence de nuages dès le temps initial; cette évidence s'accroît durant l'intégration à mesure que diminue la dépression du point de rosée. A 700 mb, le seuil de 2 °C n'est jamais rencontré. Durant les 9 premières heures de la prévision la dépression du point de rosée a tendance à demeurer constante à ce niveau, et ne cesse d'augmenter après cette période.

En se basant uniquement sur ces profils, on peut s'attendre à ce qu'OASIS prévoit la présence de nuages bas entre la surface et le niveau 700 mb, avec un maximum d'humidité près du niveau 850 mb. On peut s'attendre aussi à ce que la diminution dans le temps de la dépression du point de rosée entre les niveaux 1000 et 850 mb ait un impact sur la hauteur de la base des nuages.

### 5.3.2 Analyse des profils du mouvement vertical

Comme pour l'estimation de la base et de l'étendue des nuages, les profils des figures 5.14 à 5.23 et les séries temporelles de la figure 5.25 nous permettent d'estimer visuellement si l'étendue des nuages a tendance à augmenter ou à diminuer en se basant sur les valeurs du mouvement vertical.

L'étude des profils des figures 5.14 à 5.23 montrent que le mouvement vertical est initialement ascendant au début de l'intégration, de la surface jusqu'à 3 000 mètres, puis devient descendant à 12H00, en demeurant cependant légèrement ascendant de la surface à 500 mètres. On peut remarquer que le mouvement vertical à 700 mb semble instable au cours des six premières heures de l'intégration.

De ces profils on peut déduire que le mouvement vertical aura pour effet d'augmenter l'étendue des nuages durant les 9 premières heures de la prévision, et ensuite de diminuer leur étendue.

## 5.4 Présentation des prévisions produites par OASIS

La présente section présente les prévisions produites par OASIS après assimilation des données présentées dans les sections précédentes. Après avoir intégré dans sa base de faits les données du 3 juin 1988 à 00H00 TUC, OASIS produit un ensemble de prévisions de

hauteurs et d'étendues de nuages bas, pour chacune des 24 heures de la prévision. Ces prévisions figurent au tableau 5.2. Sur ce tableau figurent dans l'ordre: l'heure de validité de la prévision, la base, le sommet et l'étendue de la ou des couche(s) de nuages. Le suffixe "Z" qui apparaît après l'heure de la prévision est l'abréviation du symbole "Zulu", utilisé pour représenter l'heure universelle. La base et le sommet des nuages sont indiqués en mètres. Le suffixe "+", qui apparaît après le sommet des nuages, montre que le sommet de la couche est supérieur à 2100 mètres. Peu de temps après l'impression de ces prévisions d'une heure, la prévision officielle d'OASIS apparaît, conforme aux standards de MANAIR [MANAIR, 85]. Cette prévision est illustrée au tableau 5.3.

Tel que mentionné au début de cette section, la validation de ces résultats n'était pas complétée lorsque ce document a été déposé. Au premier abord, ces résultats semblent correspondre à ceux attendus, mais tant que la validation du code ne sera pas complétée il est plus prudent de ne pas émettre d'opinion sur la qualité des prévisions.

| Heure | Base | Sommet | | Étendue |
|---|---|---|---|---|
| 00Z | | 1500 | 2100+ | (BKN OCNL SCT) |
| 01Z | | 1200 | 2100+ | (BKN OCNL SCT) |
| 02Z | | 1200 | 2100+ | (BKN OCNL SCT) |
| 03Z | | 1200 | 2100+ | (BKN OCNL SCT) |
| 04Z | | 1200 | 2100+ | (BKN OCNL SCT) |
| 05Z | | 1200 | 2100+ | (BKN OCNL SCT) |
| 06Z | | 1200 | 2100+ | (BKN OCNL SCT) |
| 07Z | | 600 | 2100+ | (BKN) |
| 08Z | | 600 | 2100+ | (BKN) |
| 09Z | | 600 | 2100+ | (BKN) |
| 10Z | | 600 | 2100+ | (BKN) |
| 11Z | | 600 | 2100+ | (BKN) |
| 12Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |
| 13Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |
| 14Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |
| 15Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |
| 16Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |
| 17Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |
| 18Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |
| 19Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |
| 20Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |
| 21Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |
| 22Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |
| 23Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |
| 24Z | | 1200 | 2100+ | (BKN V SCT) |

Tableau 5.2 Prévisions de la hauteur et de l'étendue de nuages bas, pour chaque heure du cas du 3 juin 1988 à 00H00 TUC.

| YUL 030000 C50 BKN. 07Z C20 BKN. 12Z C40 BKN |
|---|

Tableau 5.3 Prévision émise par OASIS pour le cas du 3 juin 1988 à 00H00 TUC.

Figure 5.1 Evolution du champ de pression au niveau de la mer pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

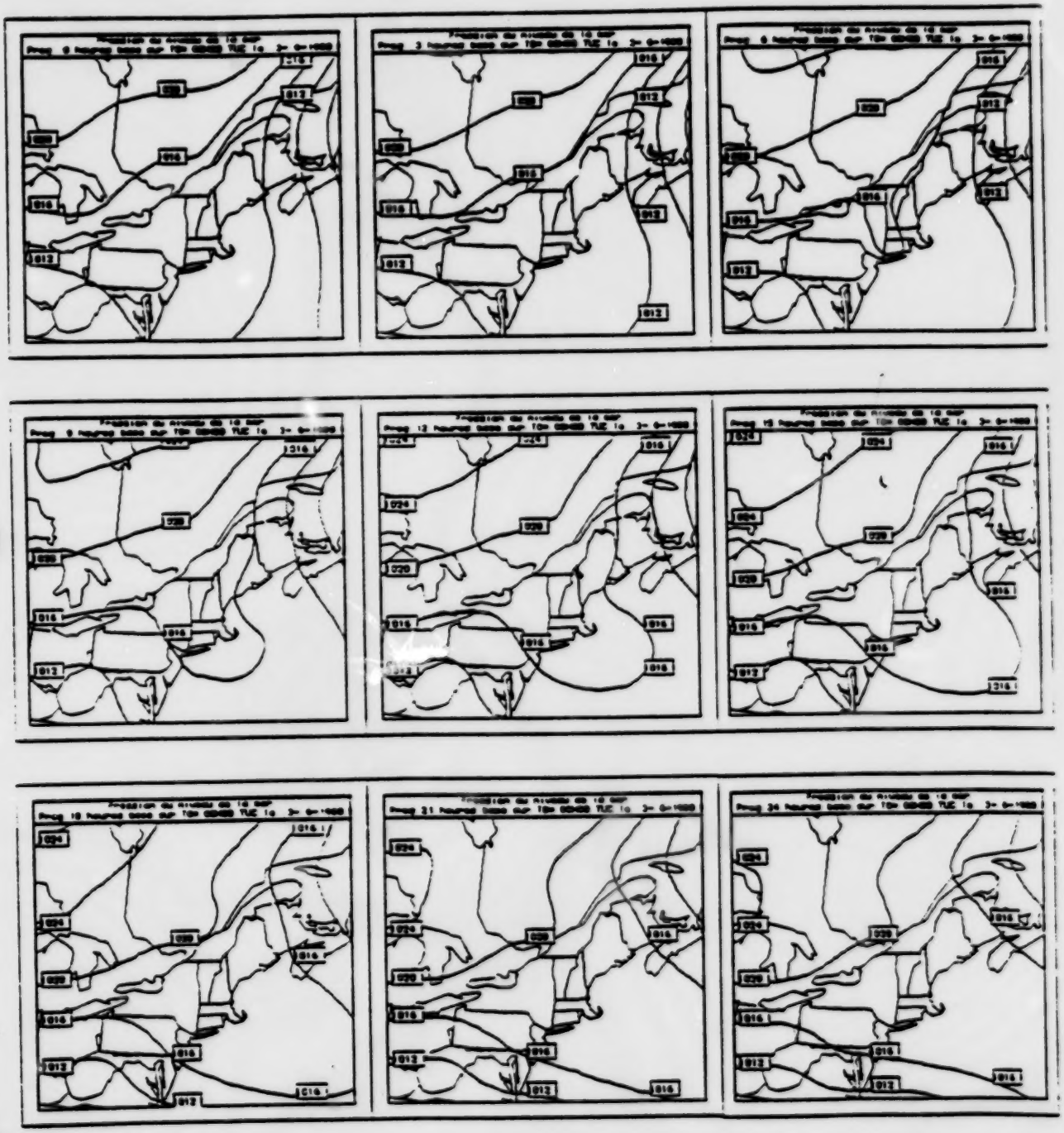


Figure 5.2 Évolution du champ de la hauteur du géopotentiel à 1000 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

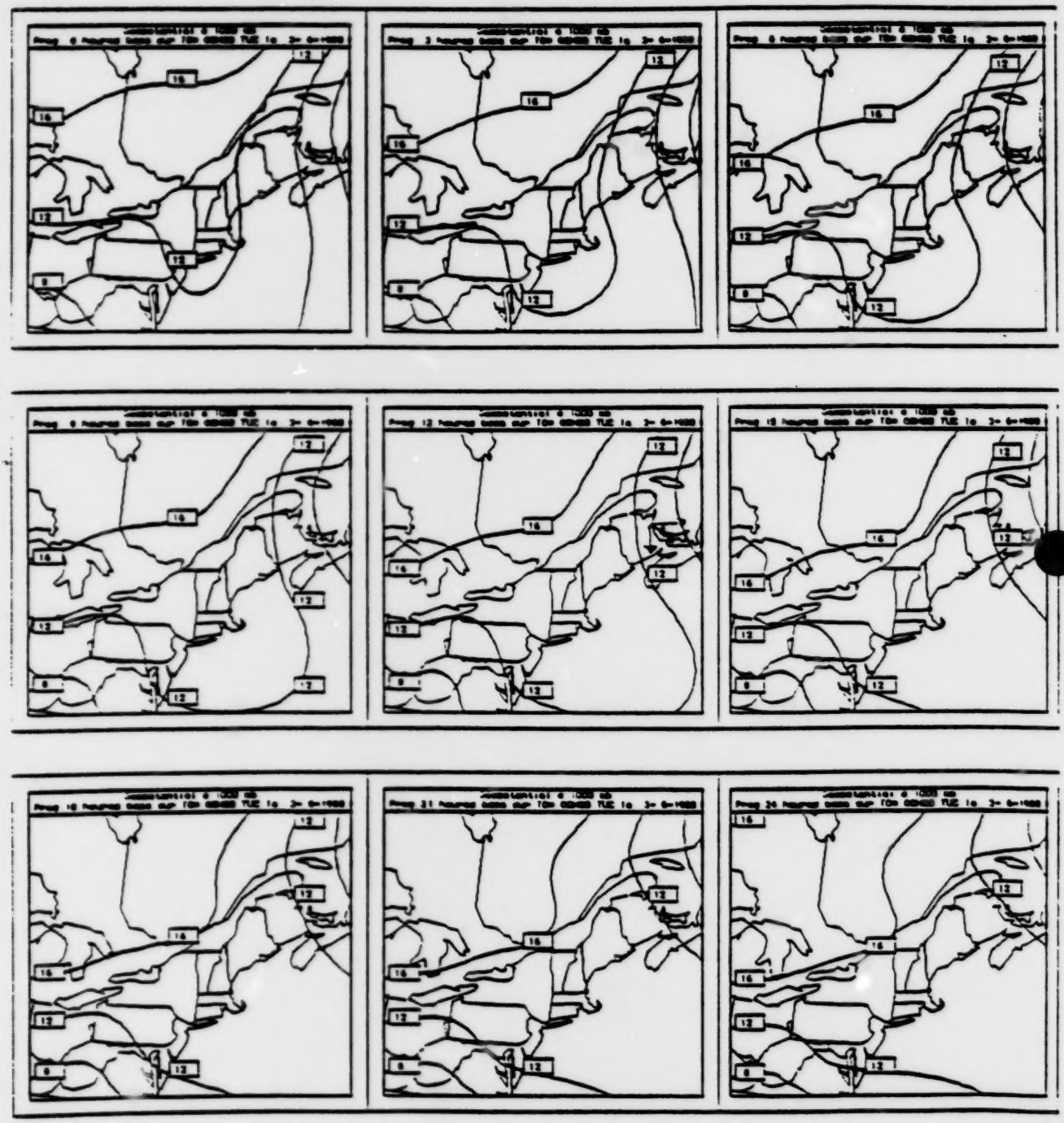


Figure 5.3 Évolution du champ de la hauteur du géopotentiel à 850 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

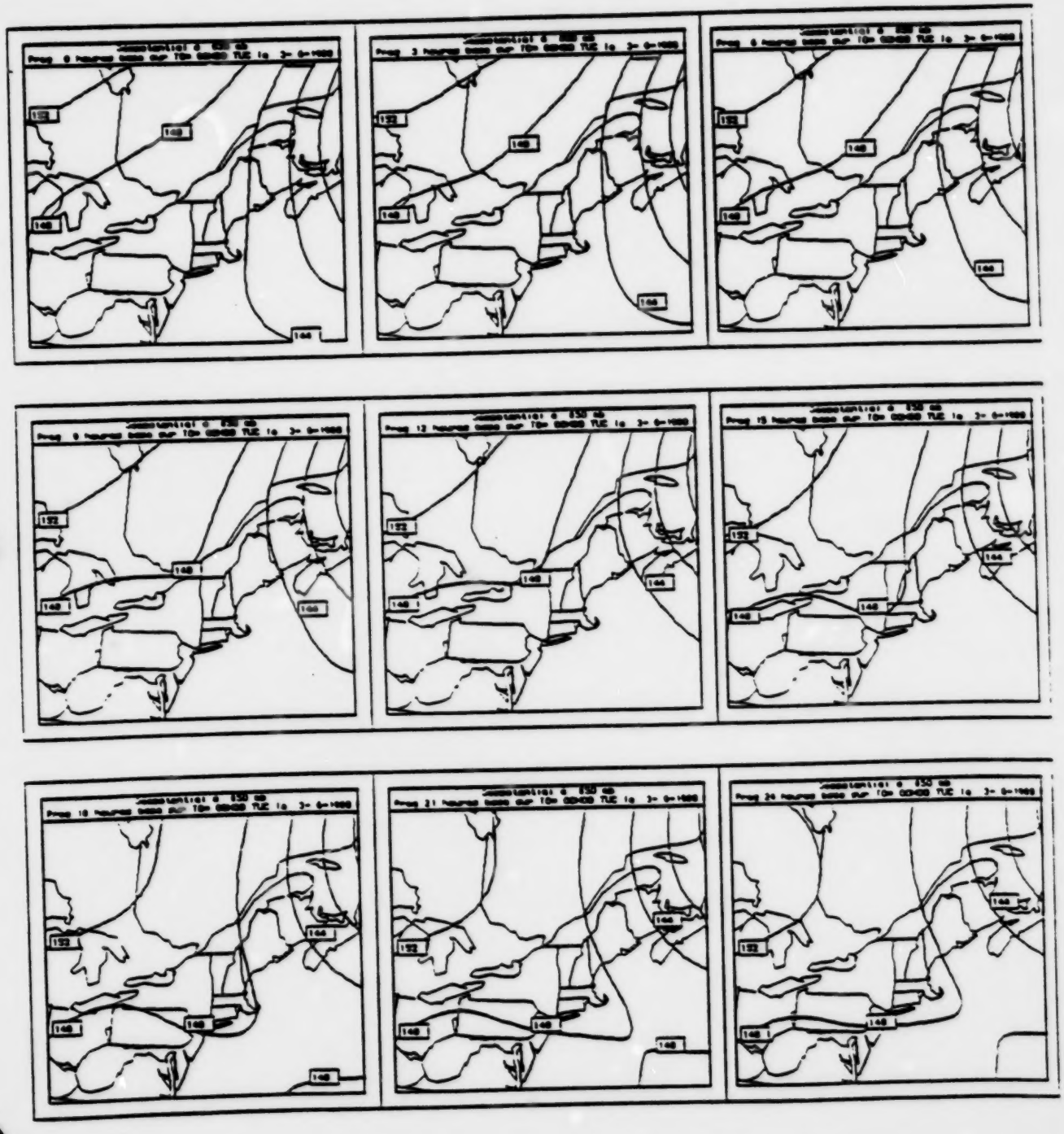


Figure 5.4 Évolution du champ de la hauteur du géopotentiel à 700 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

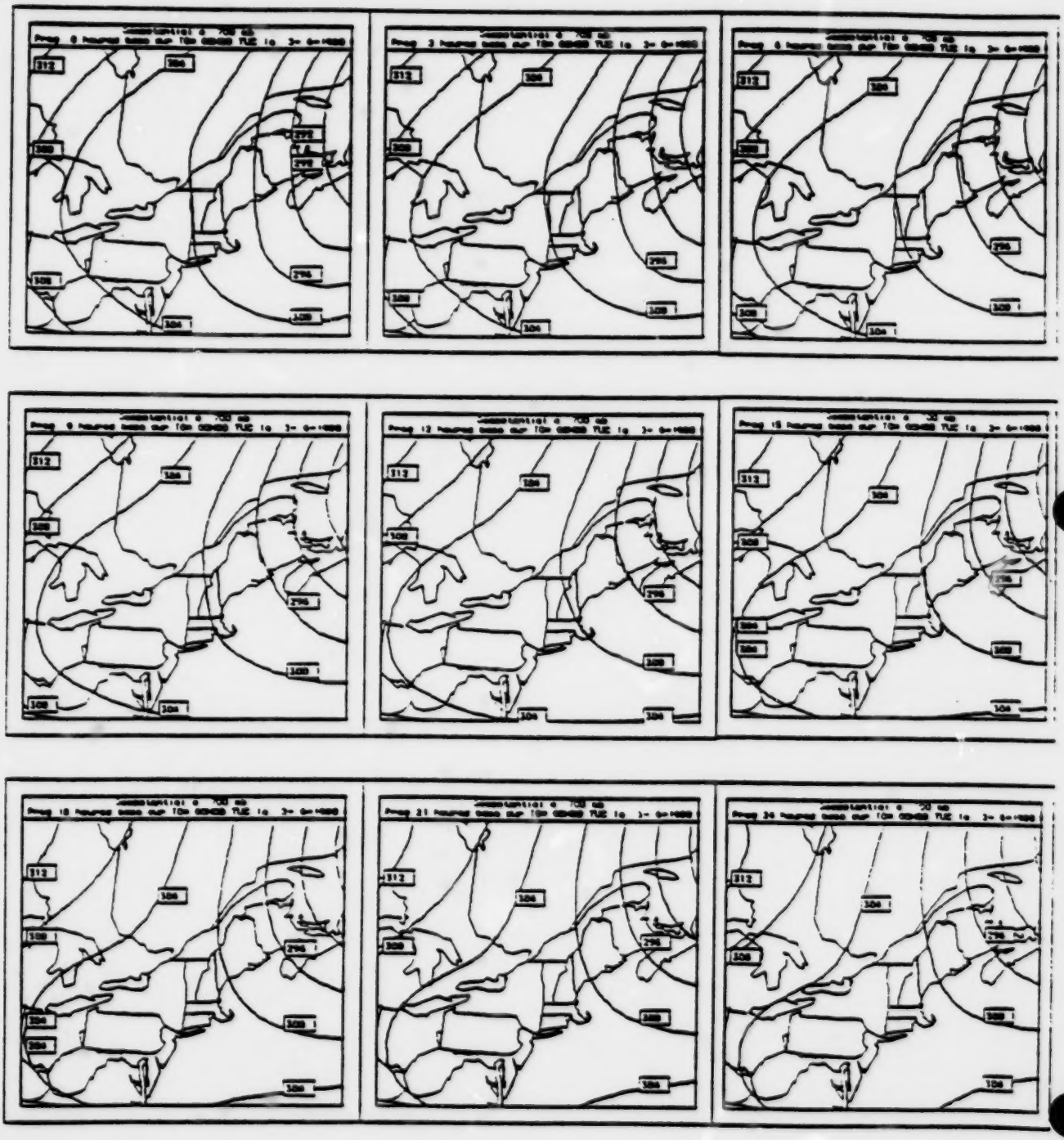


Figure 5.5 Évolution du champ de température à 1000 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

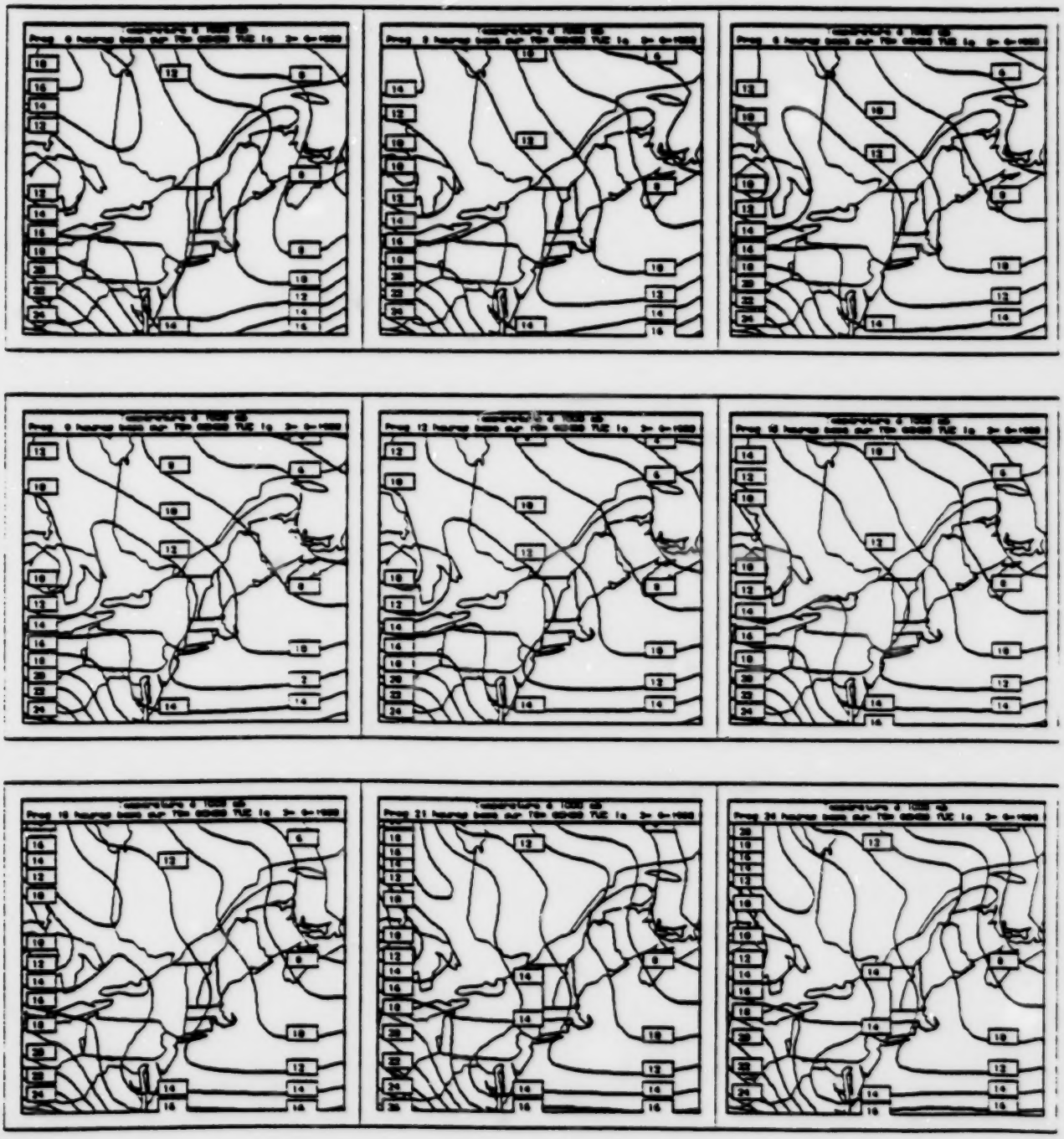


Figure 5.6 Évolution du champ de température à 850 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

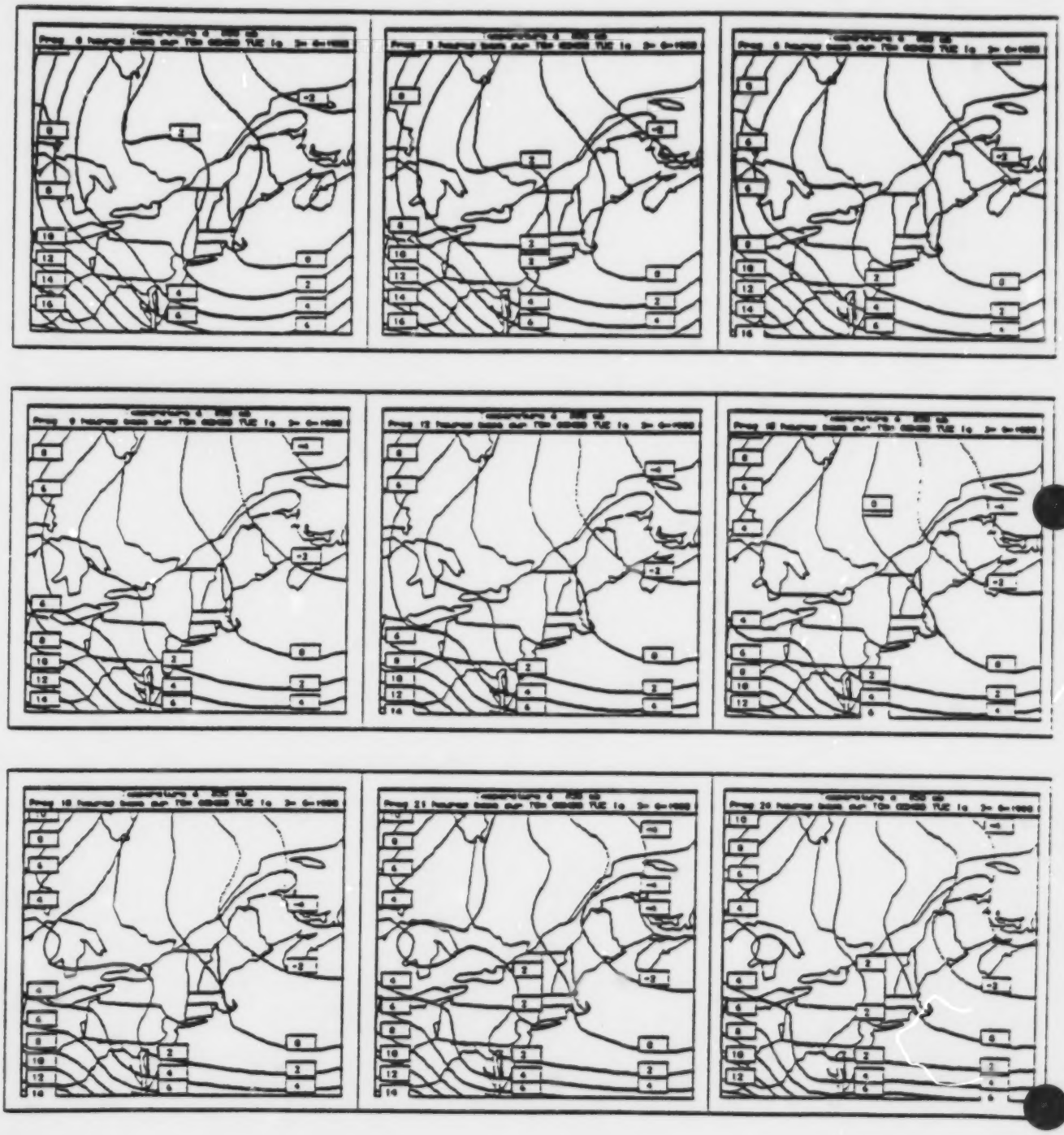


Figure 5.7 Évolution du champ de température à 700 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

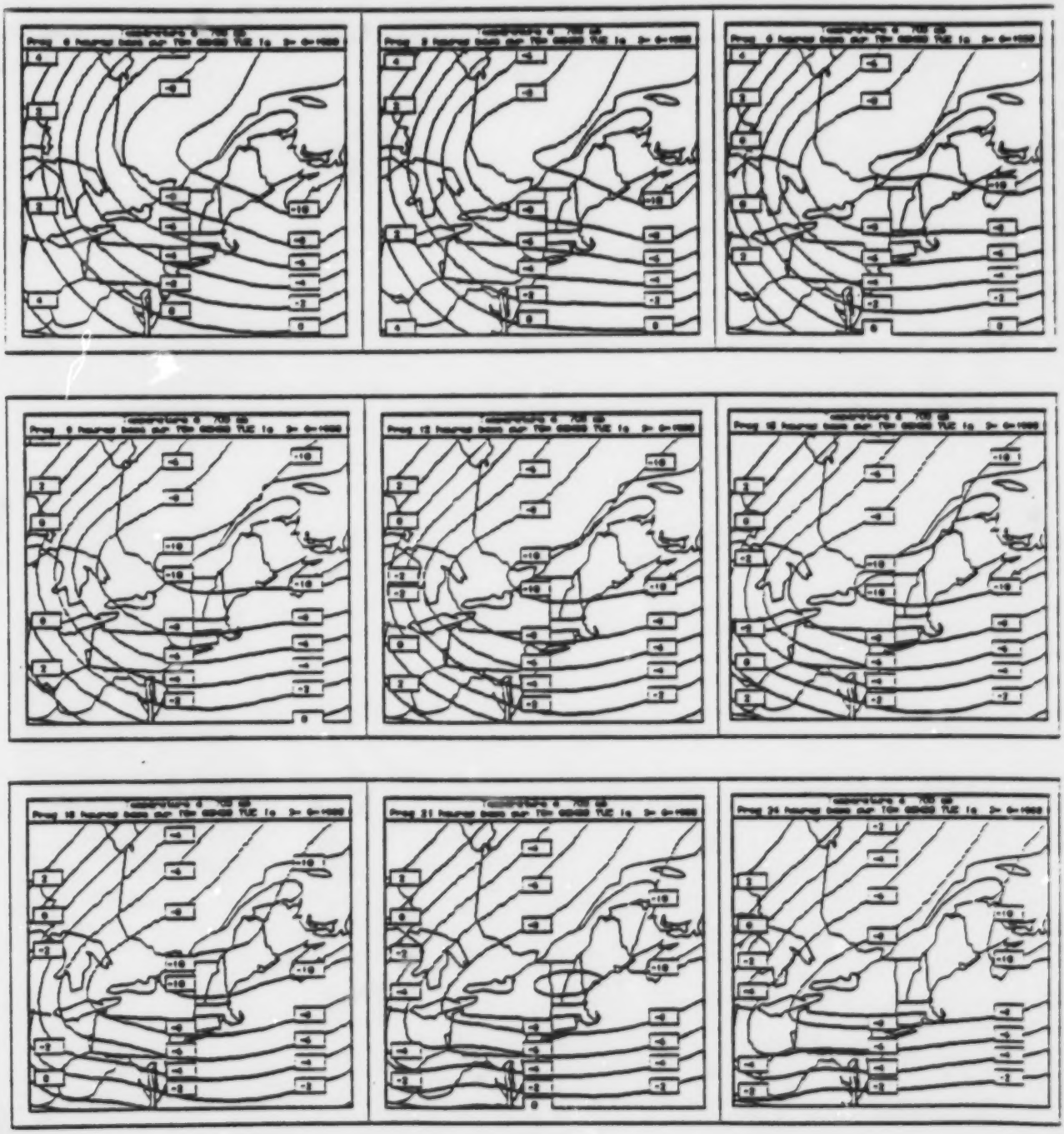


Figure 5.8 Évolution du champ de dépression du point de rosée à 1000 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

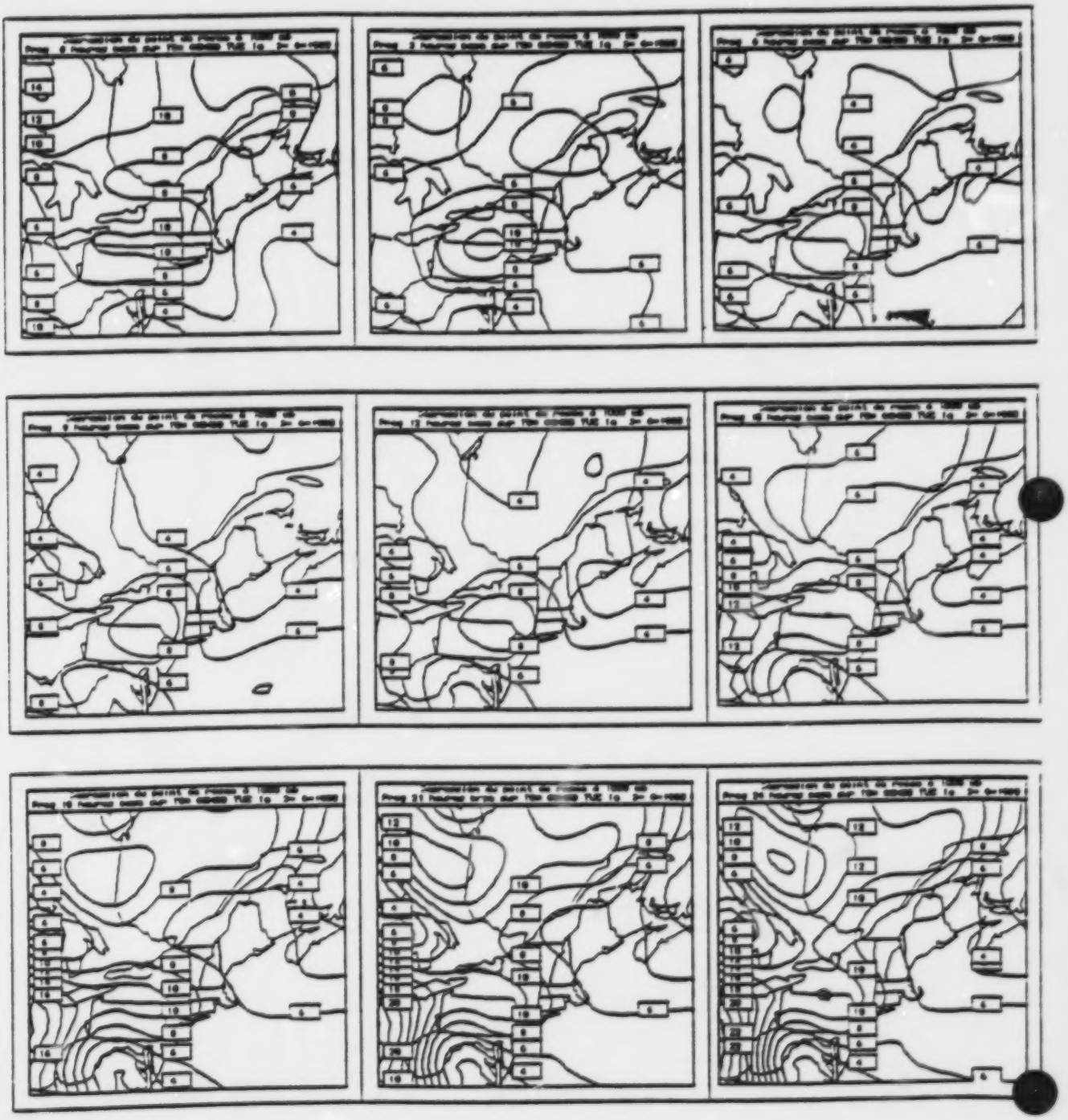


Figure 5.9 Évolution du champ de dépression du point de rosée à 850 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

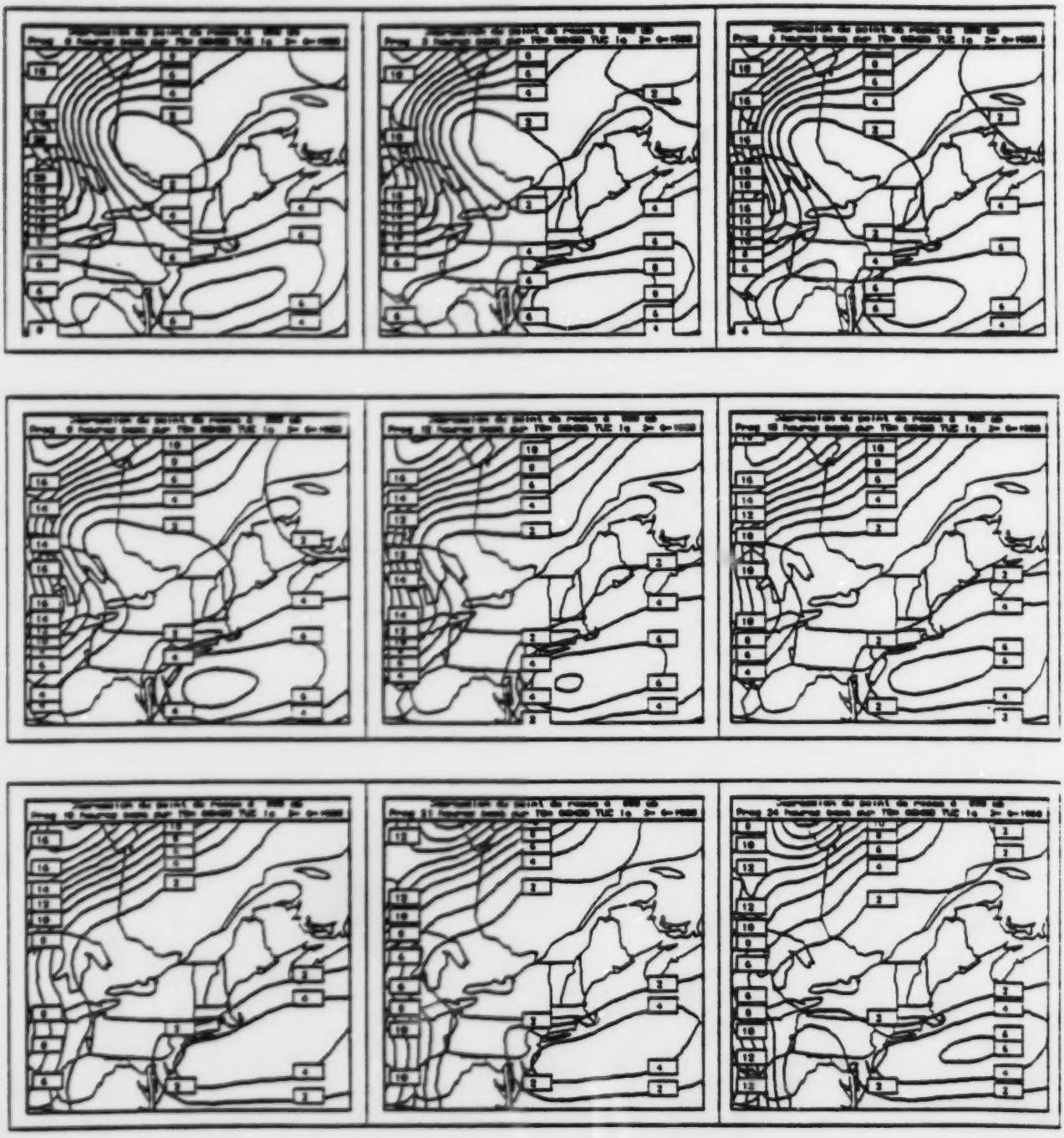


Figure 5.10 Évolution du champ de dépression du point de rosée à 700 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

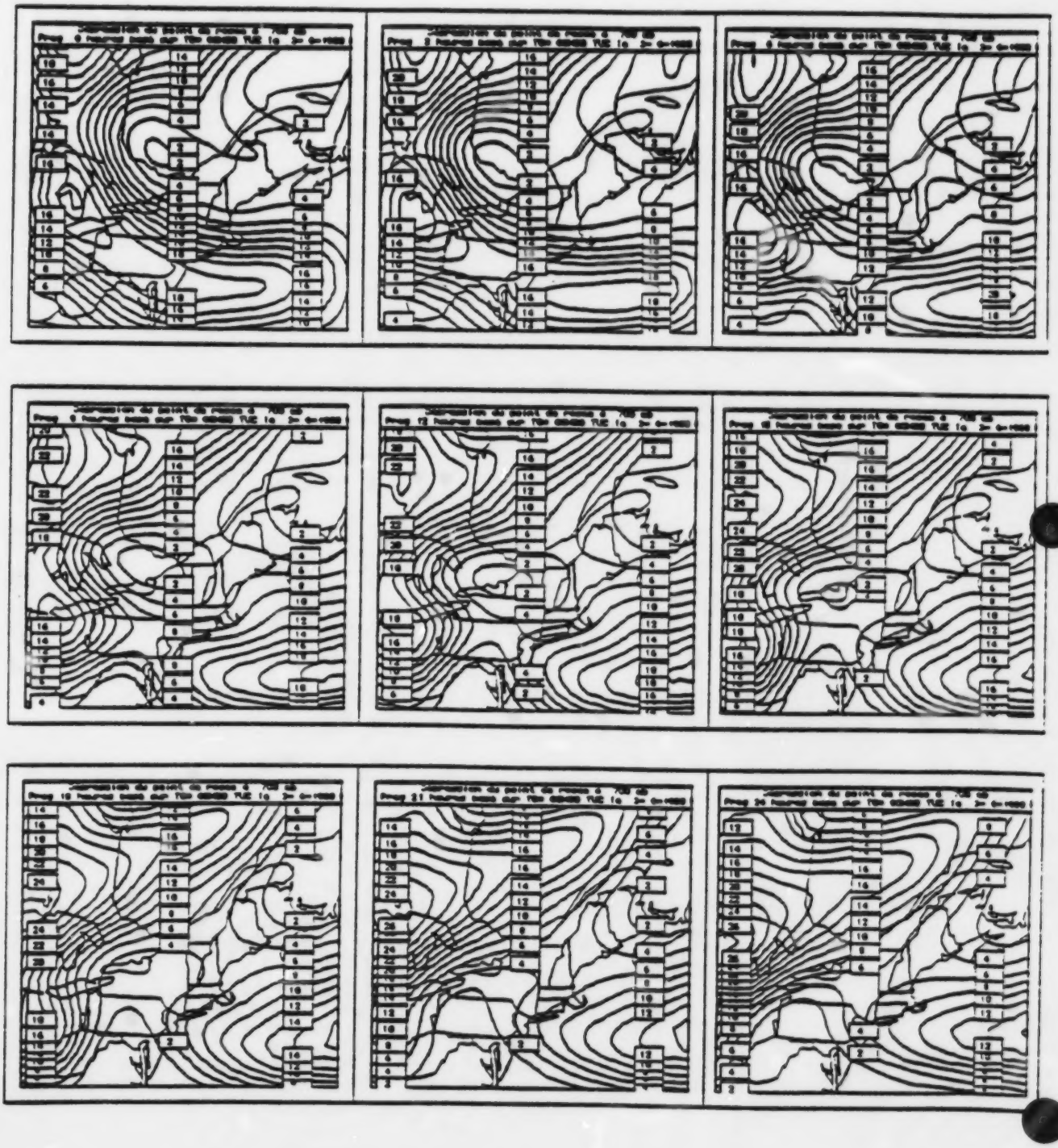


Figure 5.11 Évolution du champ de mouvement vertical à 1000 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

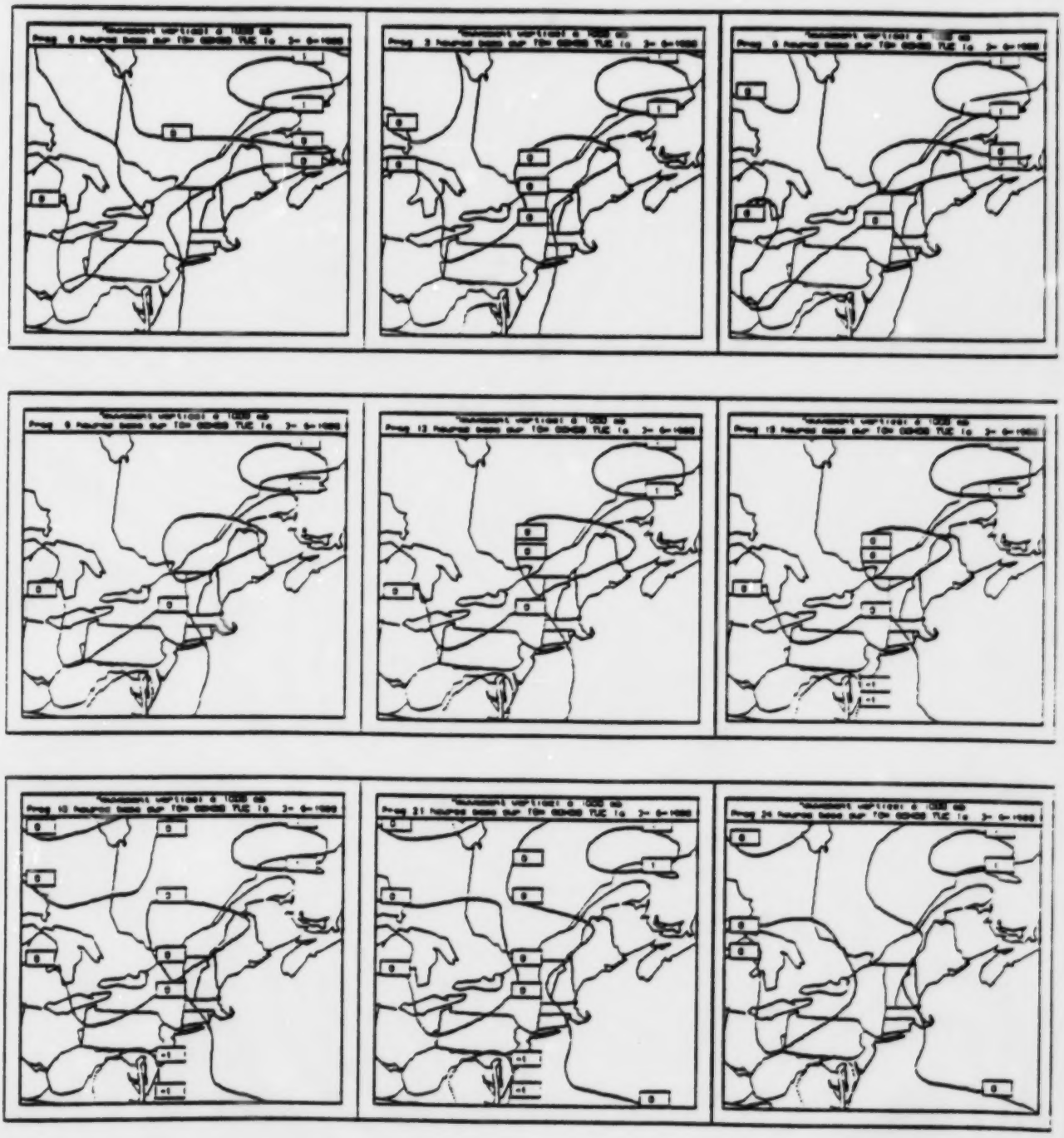


Figure 5.12 Évolution du champ de mouvement vertical à 850 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

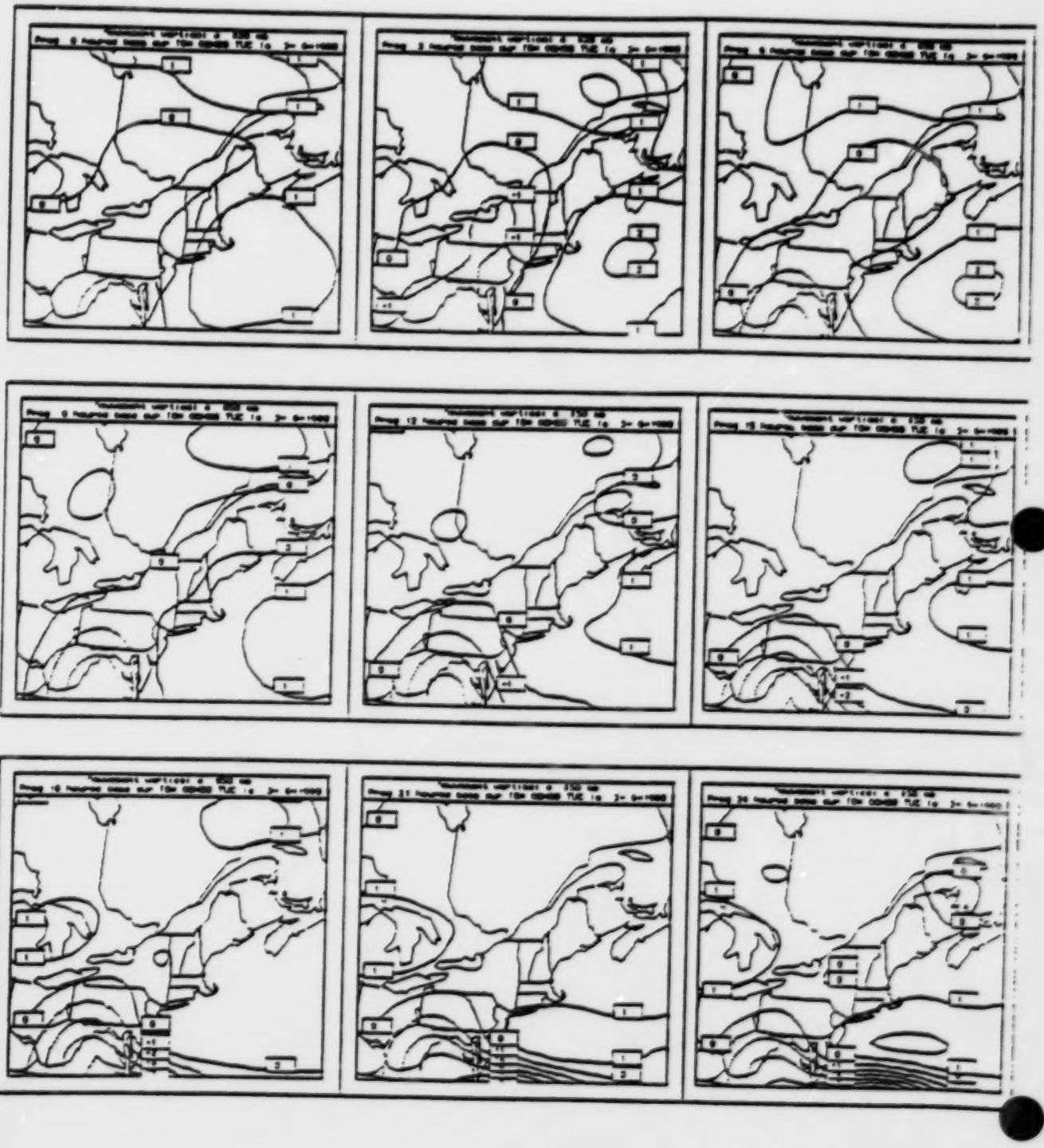


Figure 5.13 Évolution du champ de mouvement vertical à 700 mb pour le cas du 3 juin à 00h00 TUC

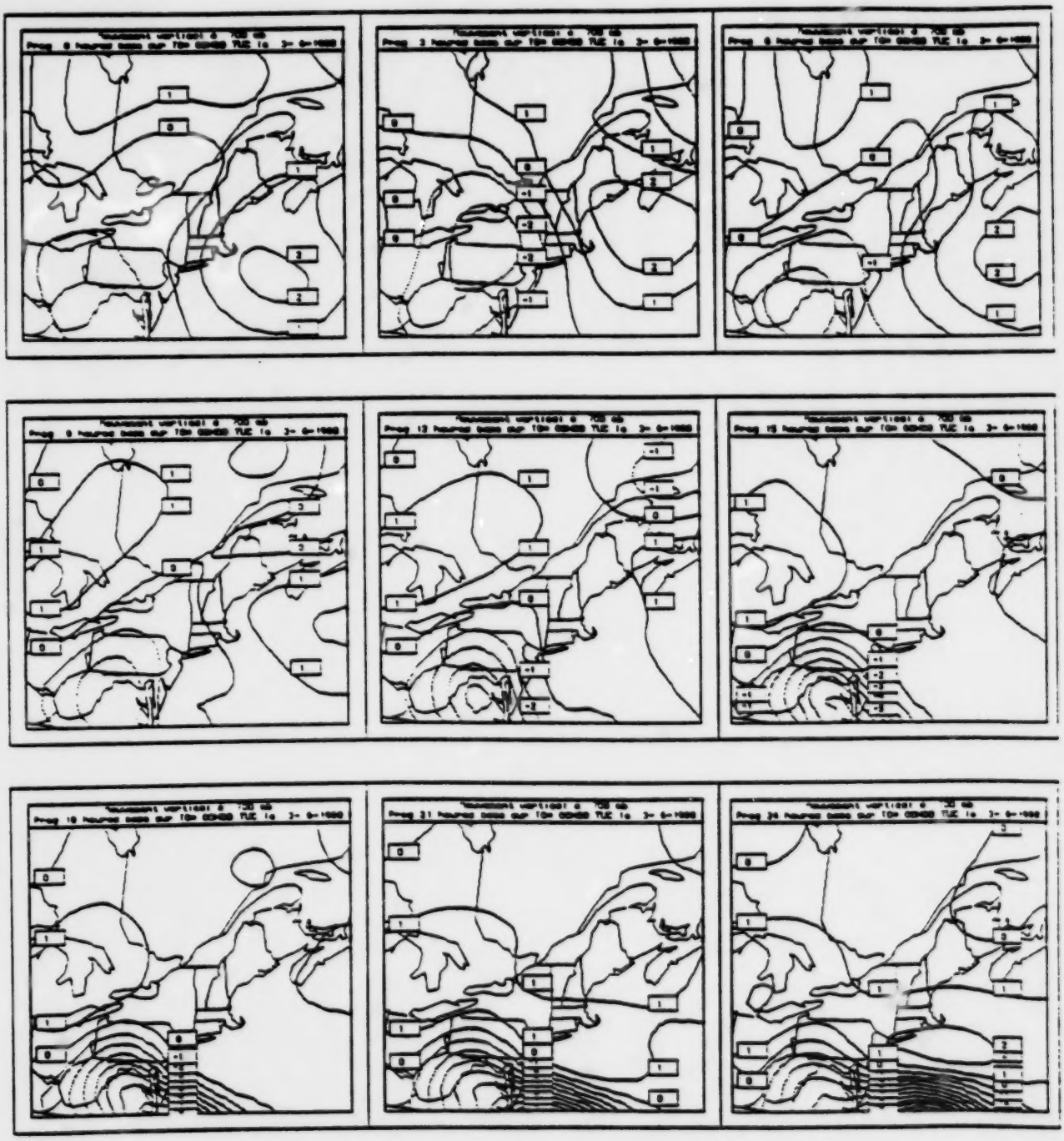


Figure 5.14 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 00 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988

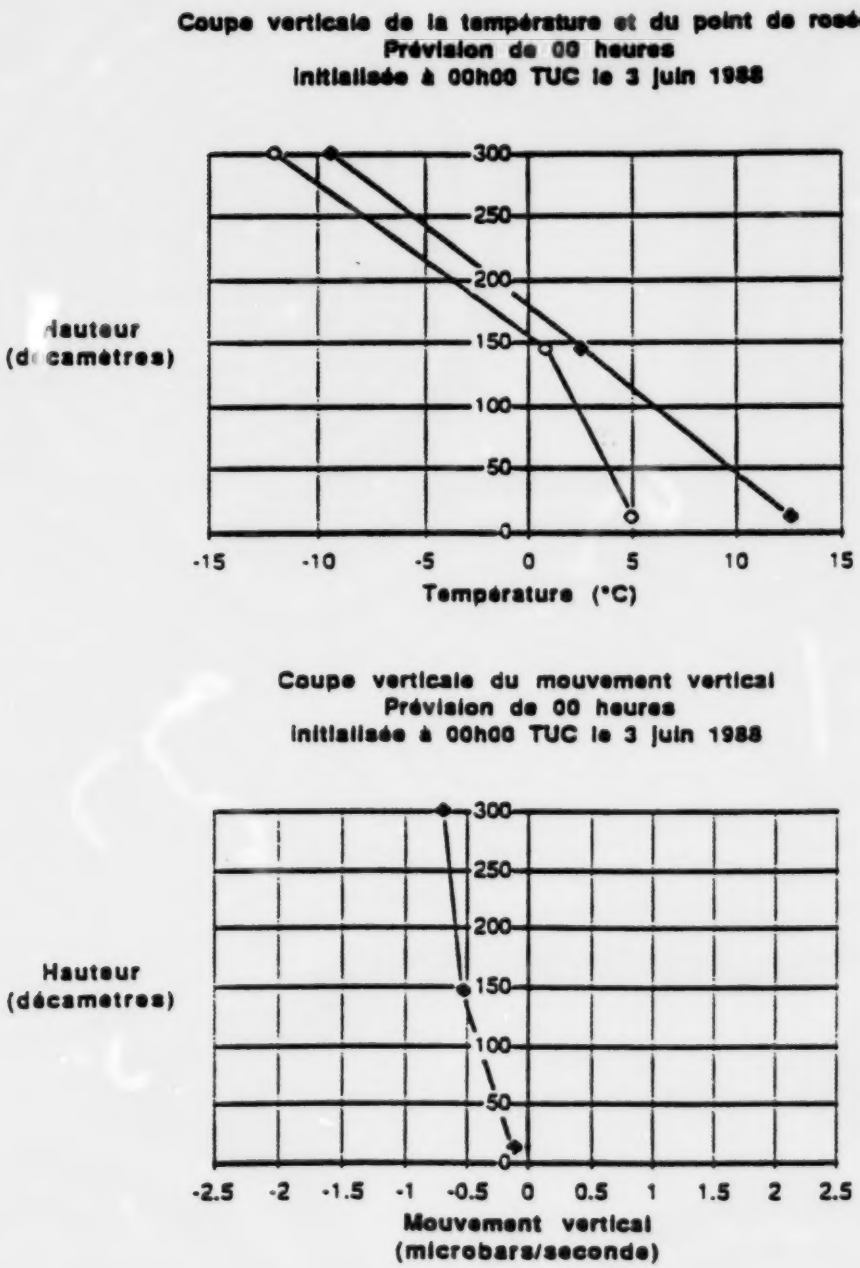


Figure 5.15 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 03 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988

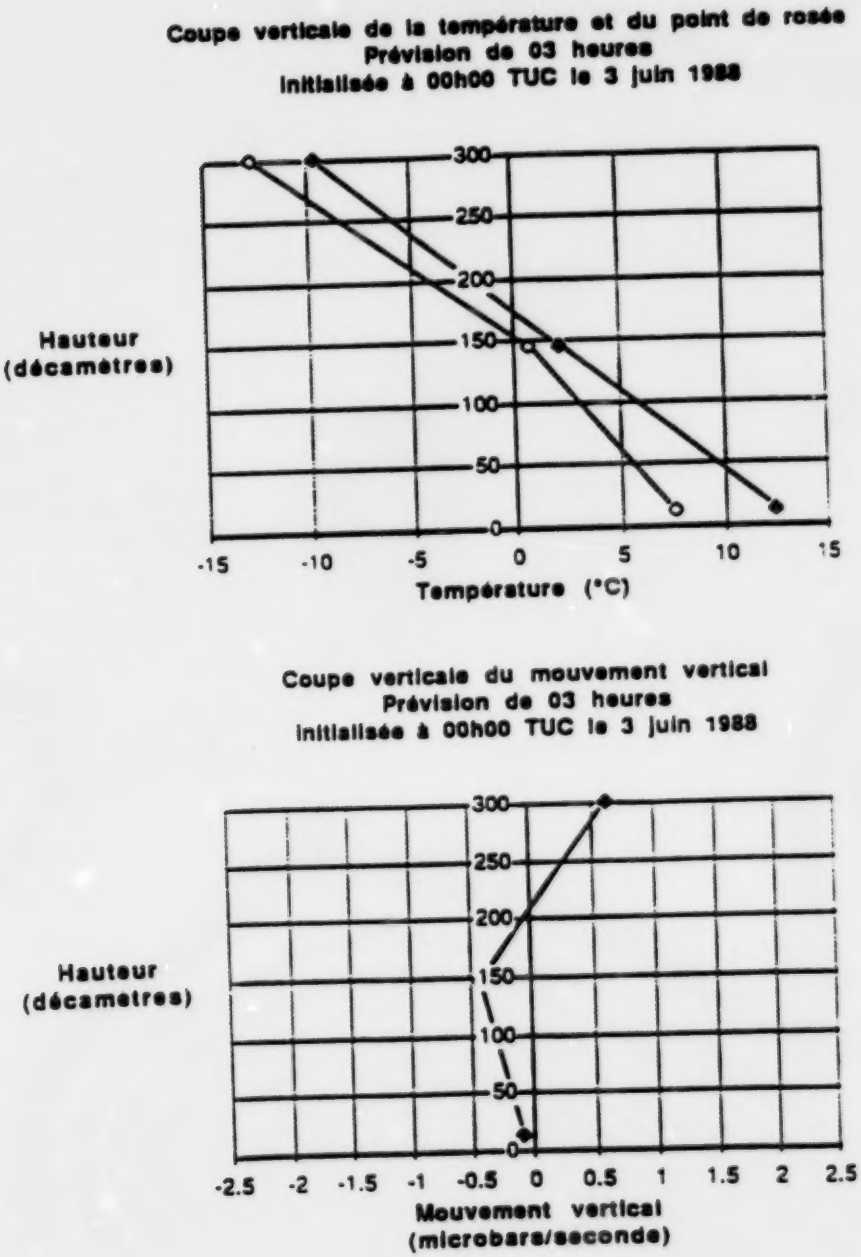


Figure 5.16 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 06 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988

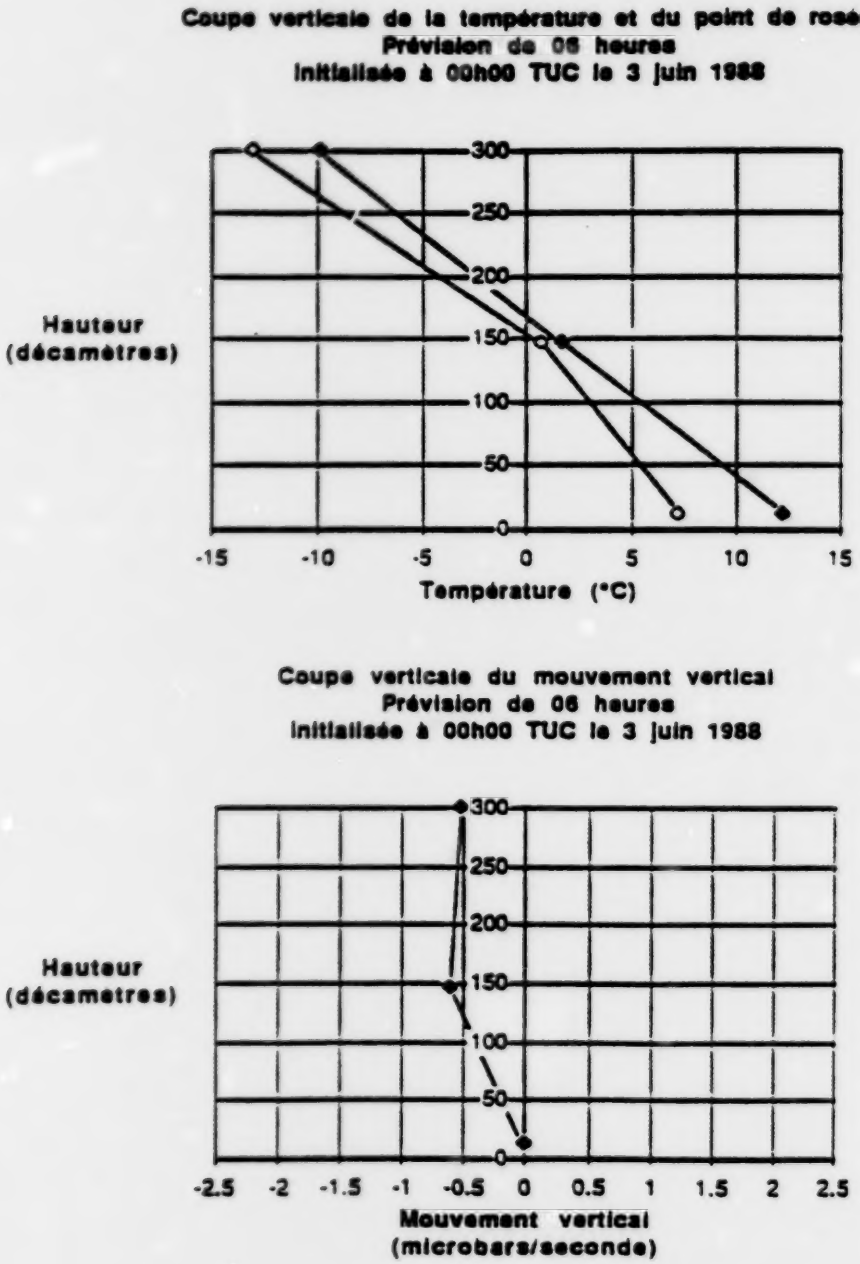
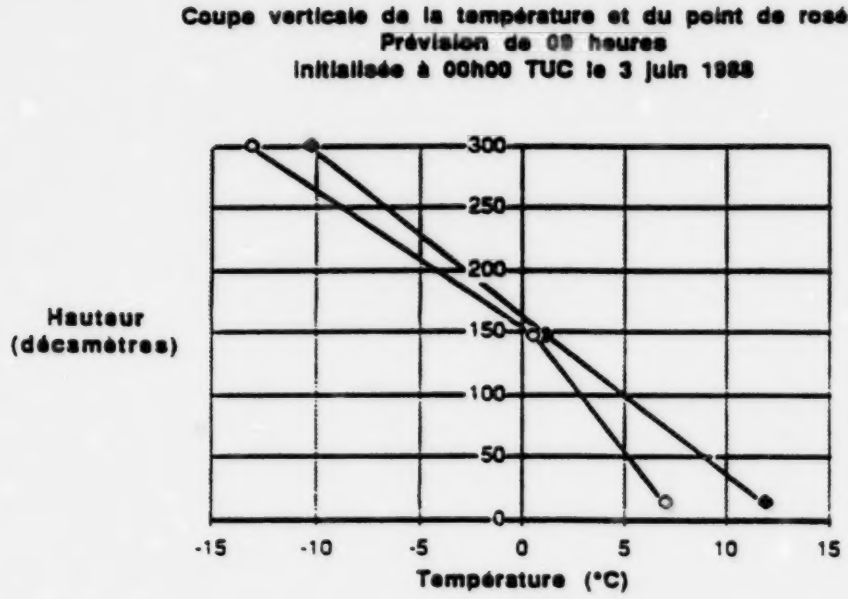


Figure 5.17 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 09 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988



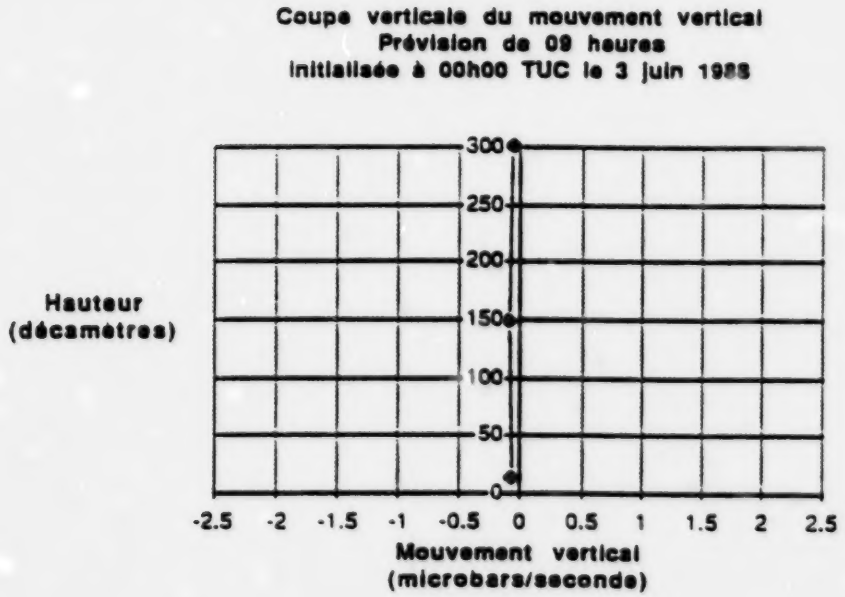
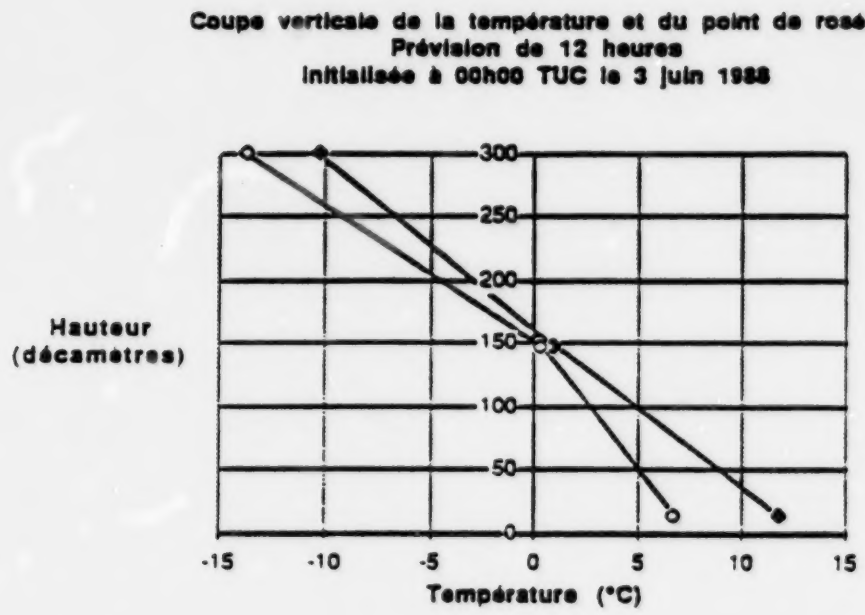



Figure 5.18 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 12 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988.



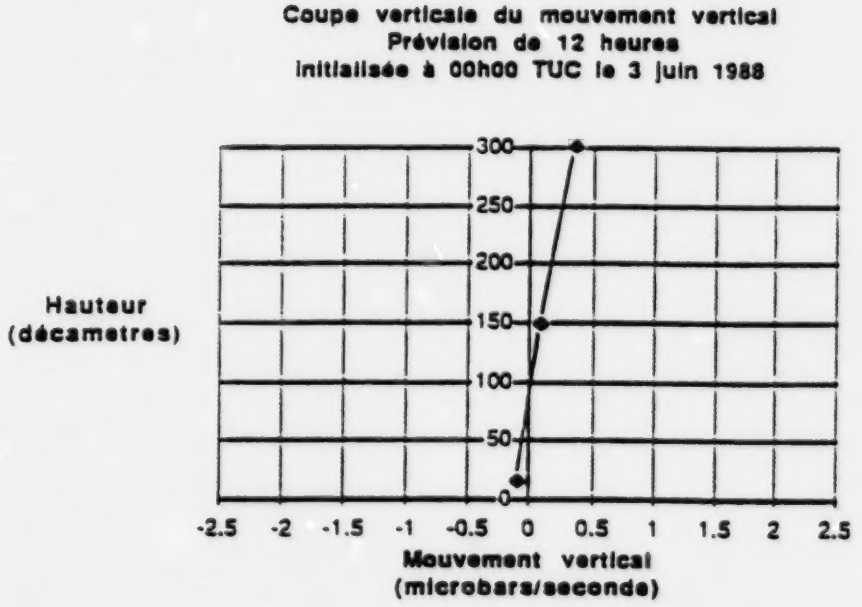



Figure 5.19 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 15 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988

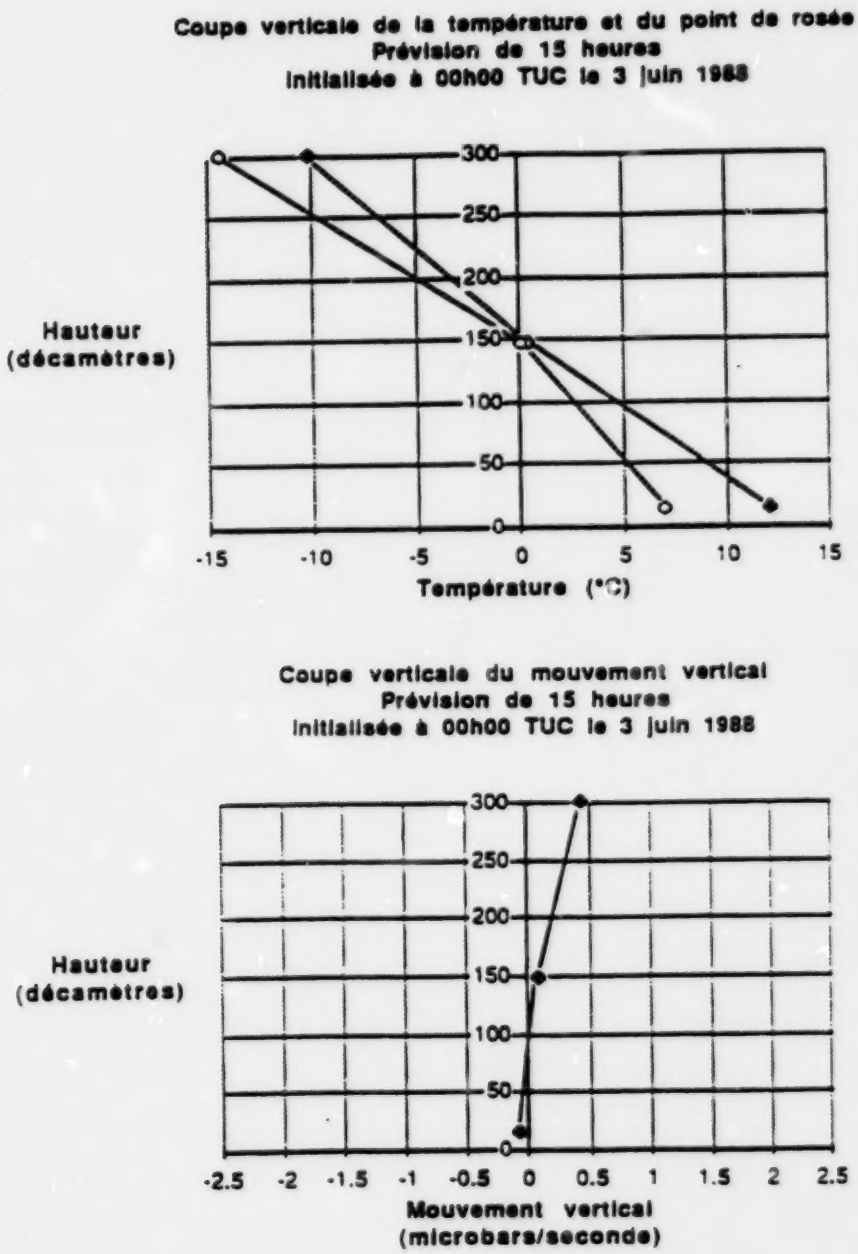


Figure 5.20 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 18 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988

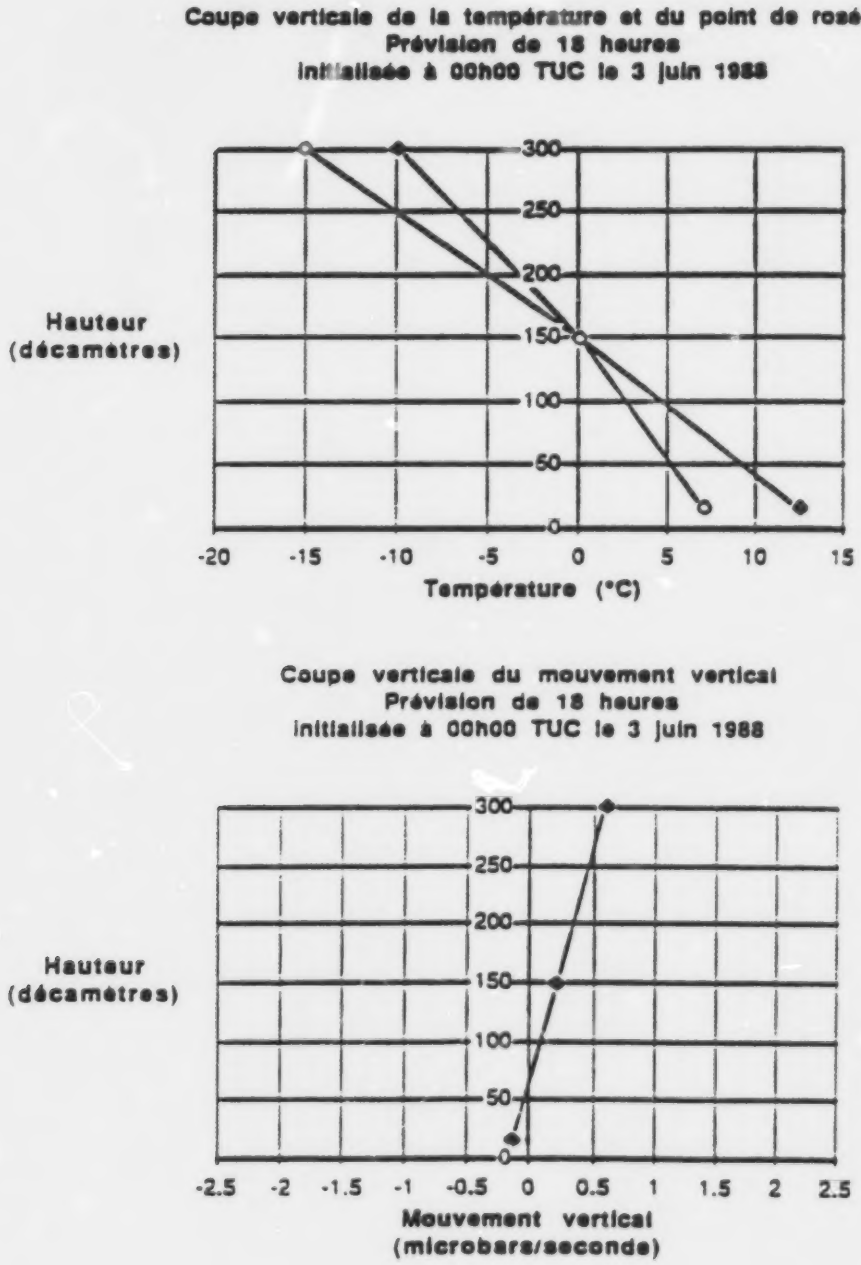


Figure 5.21 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 21 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988

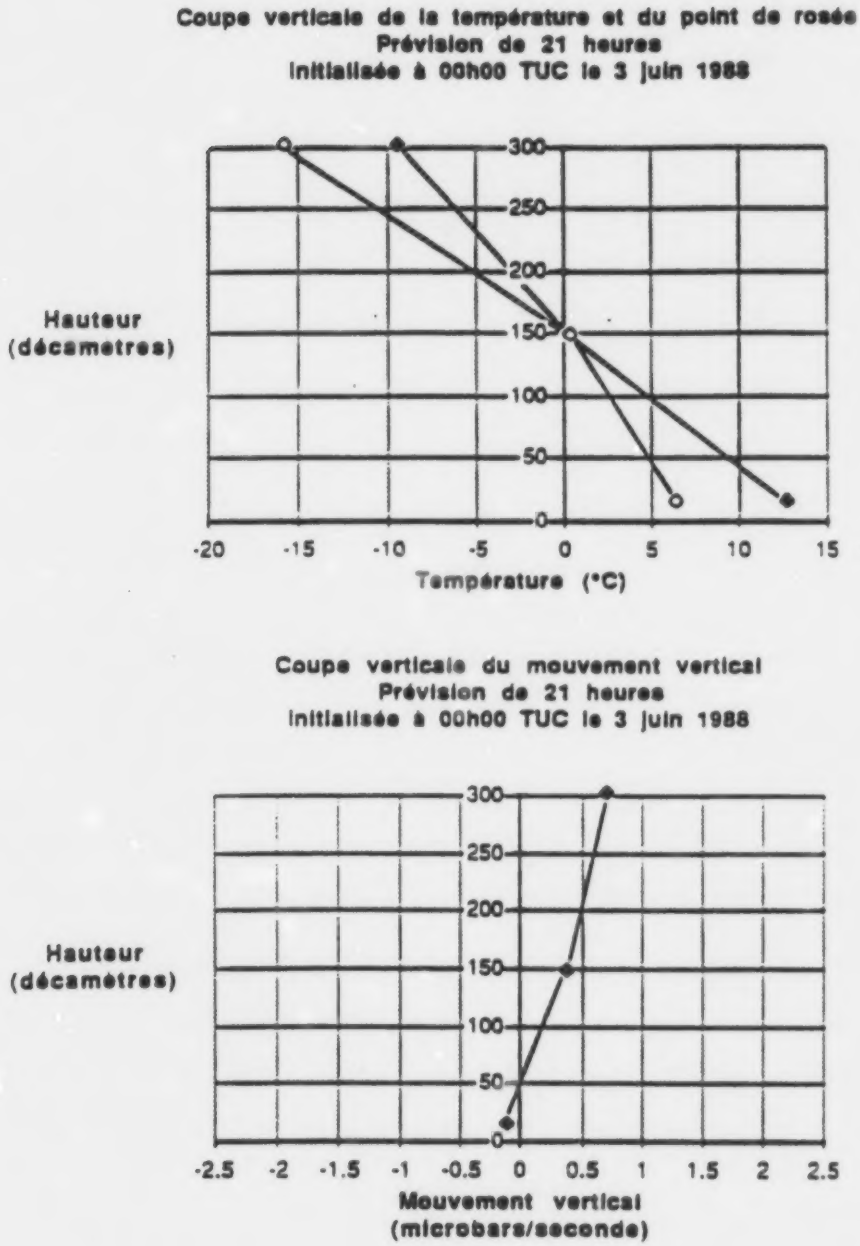
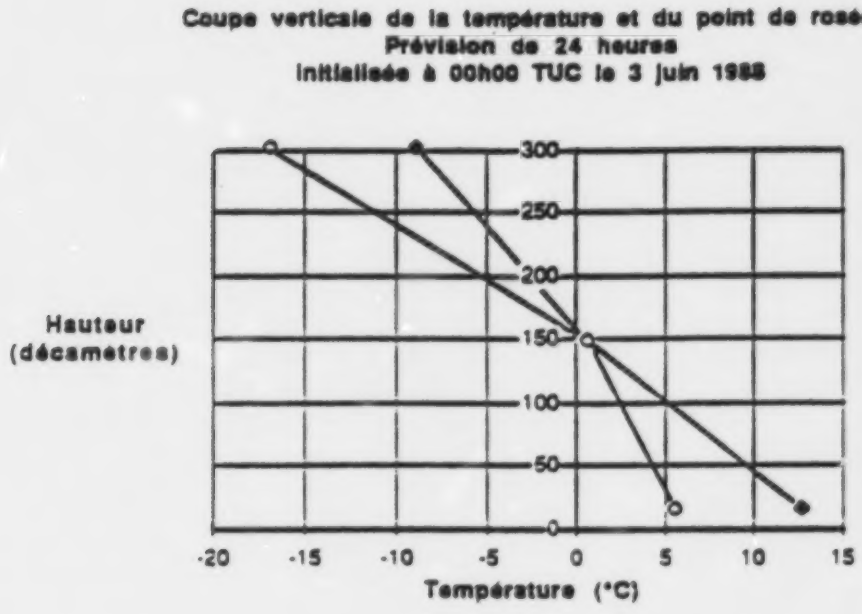


Figure 5.22 Coupe verticale de la température, du point de rosée et du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval pour la prévision de 24 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988



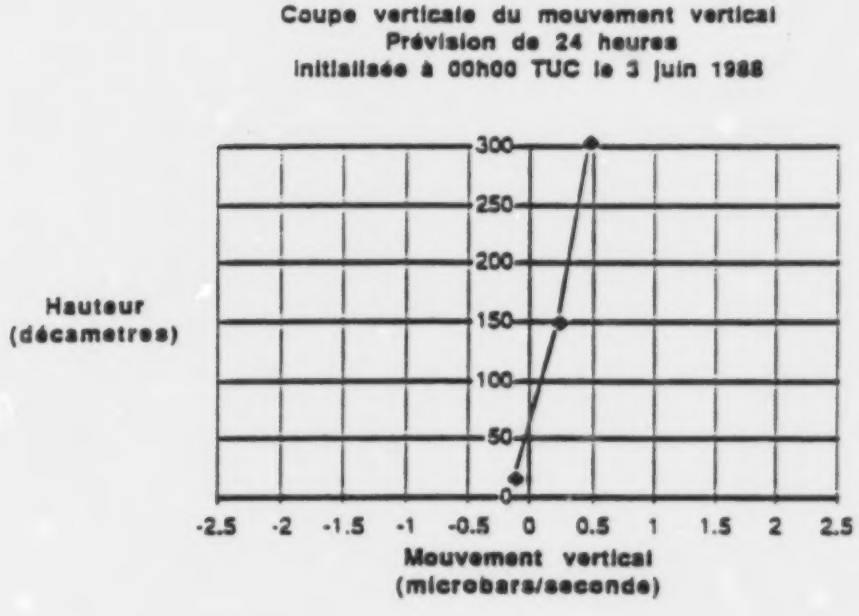



Figure 5.23 Évolution de la température et du point de rosée à l'aéroport de Dorval aux niveaux 1000, 850 et 700 mb pour la prévision de 24 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988

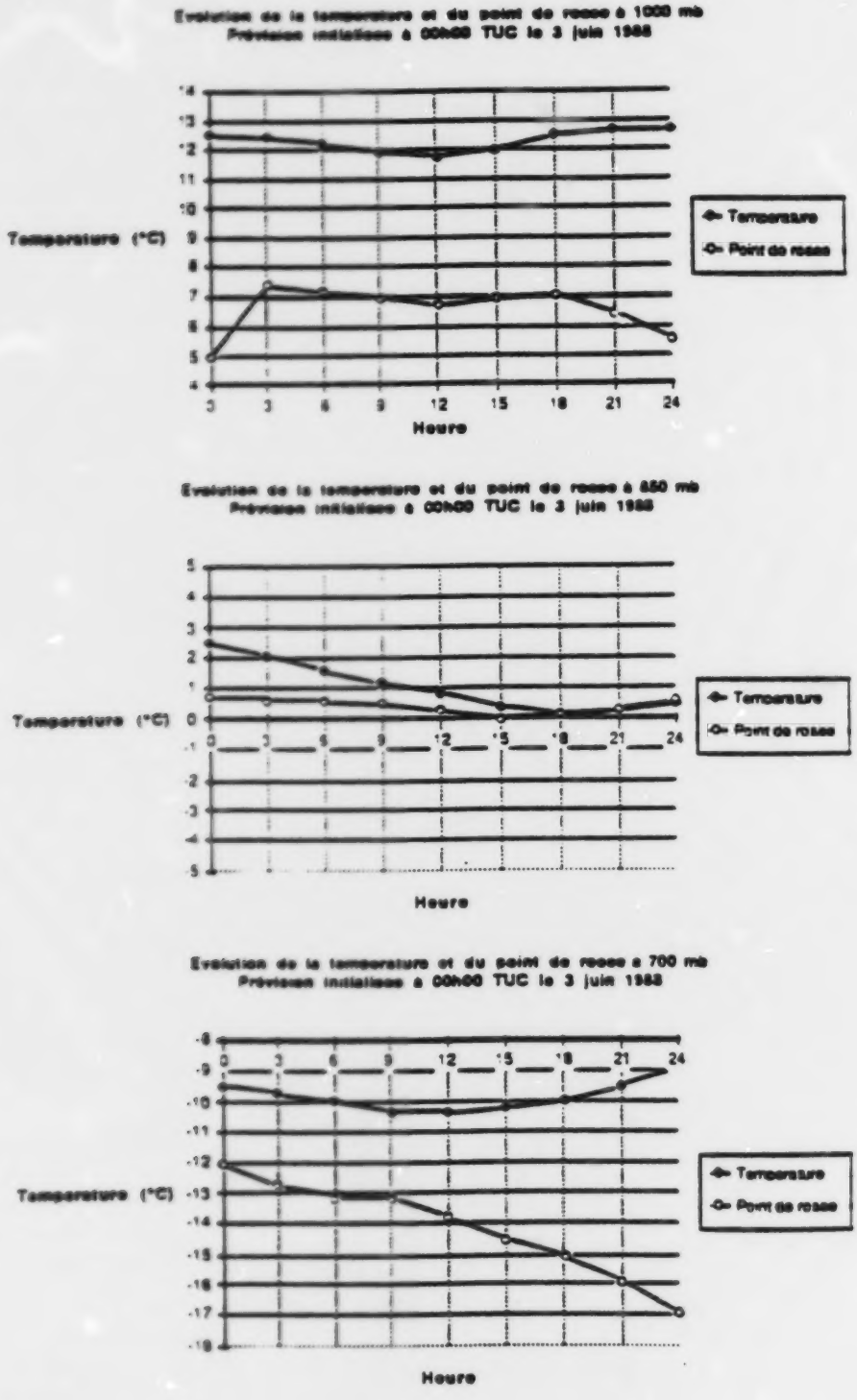
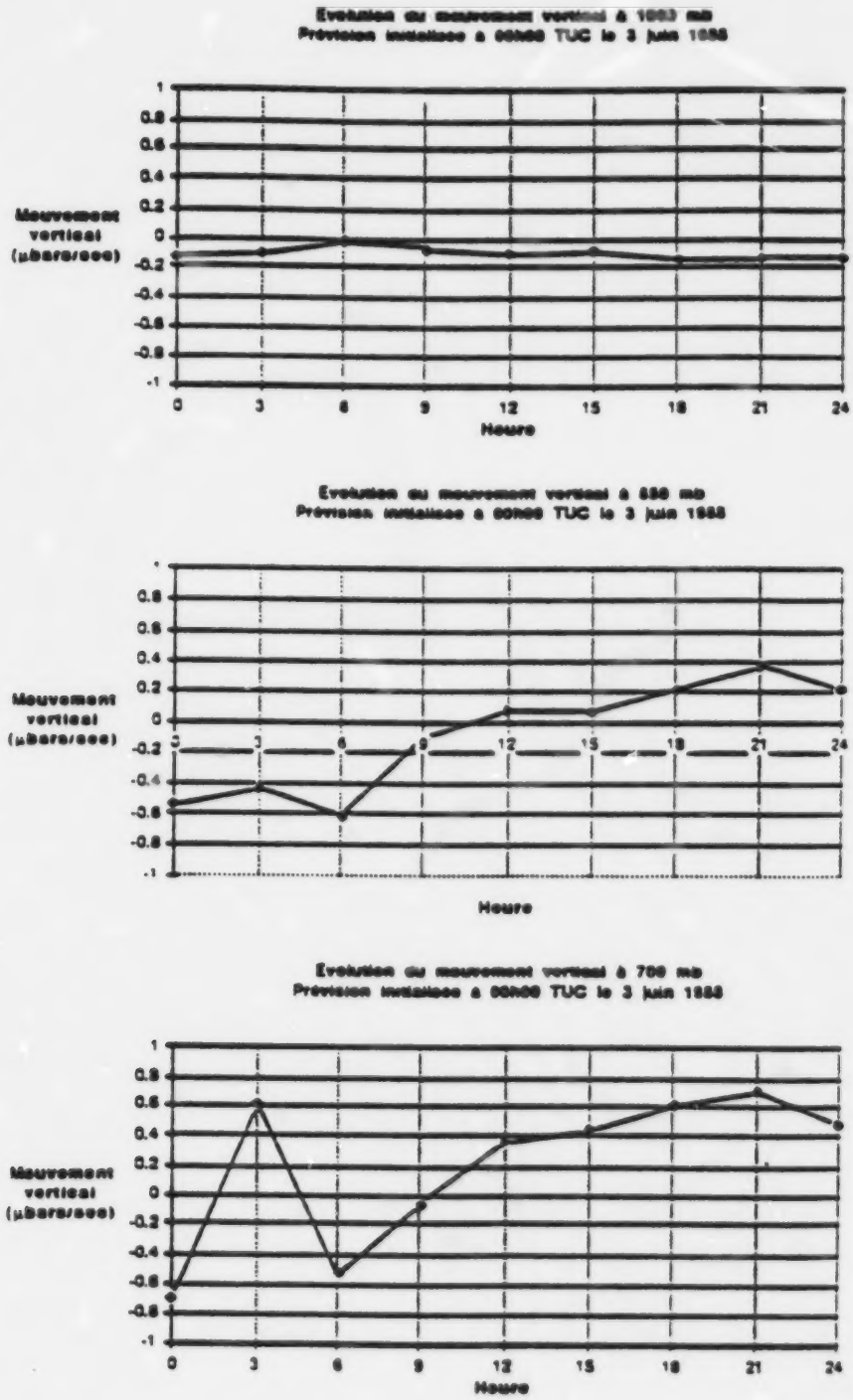


Figure 5.24 Évolution du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval aux niveaux 1000, 850 et 700 mb pour la prévision de 24 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988



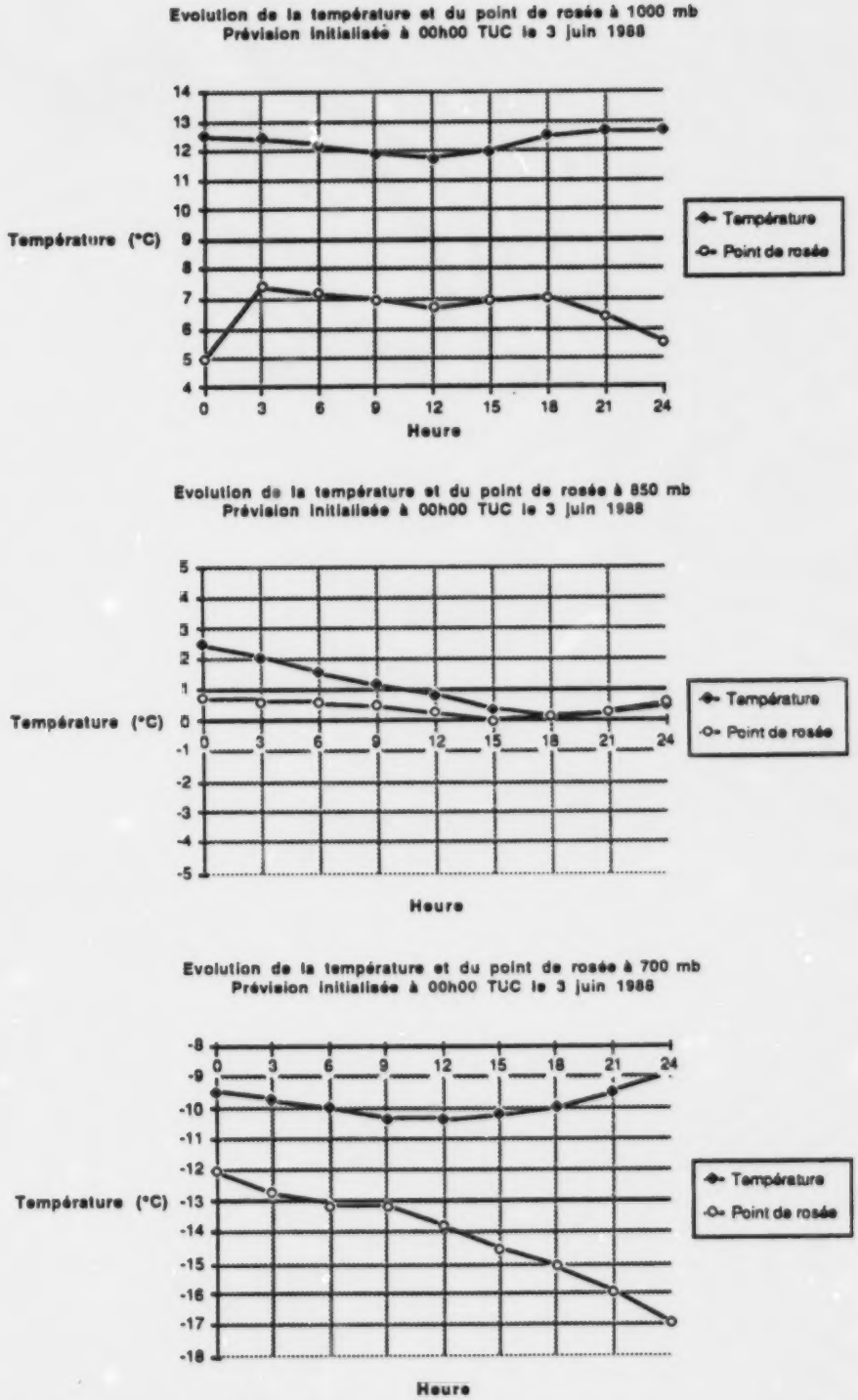



Figure 5.23 Évolution de la température et du point de rosée à l'aéroport de Dorval aux niveaux 1000, 850 et 700 mb pour la prévision de 24 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988

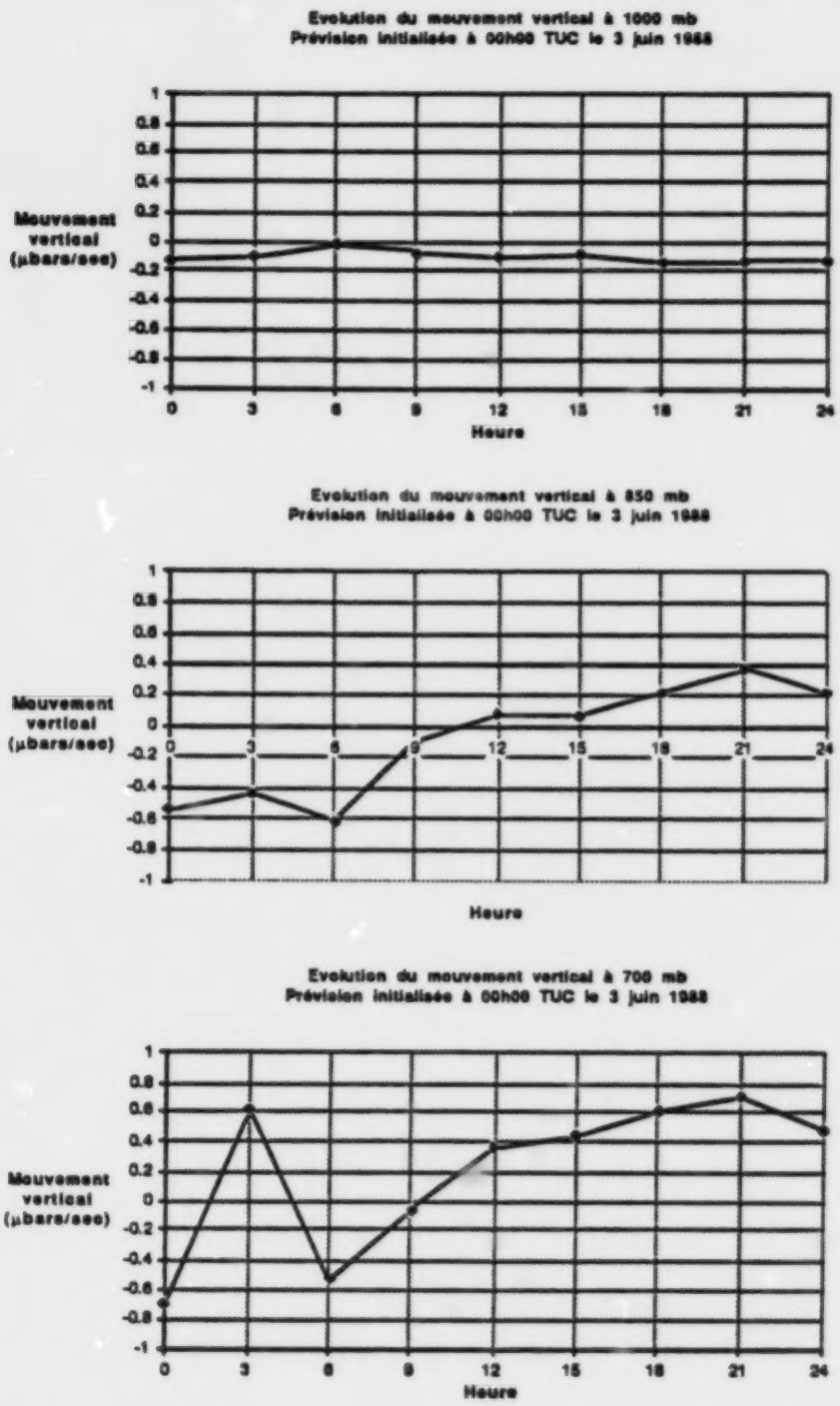



Figure 5.24 Évolution du mouvement vertical à l'aéroport de Dorval aux niveaux 1000, 850 et 700 mb pour la prévision de 24 heures initialisée à 00h00 TUC le 3 juin 1988

# Conclusion

L'état actuel du prototype nous permet de conclure que les objectifs définis en janvier ont été atteints. Nous avons développé un prototype fonctionnel, capable de prévoir les nuages bas pour l'aéroport de Dorval en se basant sur les sorties du modèle numérique EFR et sur les rapports horaires de cette station.

Il serait possible d'établir un parallèle entre le développement d'OASIS et le programme de formation de nouveaux météorologistes. OASIS pourrait être comparé à un jeune météorologiste, venant tout juste de commencer son apprentissage, qui essaie de produire ses prévisions en appliquant strictement ses règles de base en attendant de développer son sens du jugement. Du point de vue du traitement des données, on pourrait comparer l'ensemble des données accumulées à l'ensemble du matériel didactique dont disposerait le personnel de formation pour l'enseignement des techniques de prévision. Au début de l'apprentissage, la partie du matériel qui est utilisée est très faible mais augmente progressivement dans le temps. C'est avec cette idée en tête que nous avons procédé à la collecte des données.

Du point de vue du traitement des données, Knowledge Craft apparaît comme un outil de travail très intéressant. La faculté d'organisation hiérarchique des données et la souplesse des utilitaires LISP disponibles a aidé considérablement le prototypage rapide des programmes de transformation des données. Une faiblesse importante concerne l'archivage des schémas. Le fait de ne pouvoir conserver les schémas que sur des fichiers séquentiels, de type texte, représente un inconvénient important, du moins aux yeux de l'auteur. Il serait très avantageux que Knowledge Craft puisse être lié avec des systèmes de gestion de base de données relationnels tels qu'ORACLE ou INGRES. Ceci faciliterait la manipulation sélective des données.

Il est à espérer que de tels outils seront disponibles lorsque viendra l'intégration dans le système de données demandant une grande puissance de calcul, comme les images satellite et les rapports horaires. Autrement, nous aurons un problème majeur de performances.

# Bibliographie

**Anderson, Charles et al.** *Evaluation des références numériques des éléments météorologiques (WEDGE): Modification des programmes.* Document technique interne. Centre météorologique Canadien. Mars 1983.

**Babin, Gilles.** *Analyse objective et initialisation des modèles.* Module 7.3 du Cours Opérationnel de Météorologie # 3. Section de formation, Centre météorologique du Québec. Août 1984.

**Babin, Gilles.** *Prévisions d'aérodrome.* Module 10.1 du Cours Opérationnel de Météorologie # 3. Section de formation, Centre météorologique du Québec. Juin 1984.

**Baudoin, Raoult et Pollard, Marc.** *Réalisation d'un système expert pour la prévision à très courte échéance: SCAPIN.* Document interne. Toulouse, Centre national de la météorologie de France, 1986.

**Bourassa, Yvon.** *FESORTI. Rev 5.3 (Guide de l'usager des sorties du modèle EFR).* Document interne de la division de Recherche en prévision numérique. Centre météorologique Canadien. Décembre 1985.

**Brouillet, Benoît et St-Yves, Maurice.** *Atlas Canadien.* Les Editions françaises, Québec, 1983. 160 pages.

**Carnegie Group Corporation.** *Knowledge Craft, vol. 1 et 2.* Documentation de la version 3.2 du logiciel pour VAX/VMS, MicroVAX II et Sun-3/UNIX. Pittsburgh, 1988, Carnegie Group Inc.

**Charniak, Eugene et McDermott, Drew.** *Introduction to artificial intelligence.* Addison-Wesley, Reading, 1986.701 pages.

**Chartier, Yves.** *Entrées/sorties et vérification du système expert OASIS.* Extrait du document *An Application of Knowledge Base Systems to Meteorology.* Document interne. Montréal, Centre de recherche informatique de Montréal, 1988.

**Chartier, Yves.** *Traitement des données météorologiques*. Extrait du document *OASIS Progress Report*. Document interne. Montréal, Centre de recherche informatique de Montréal, 1988.

**Cotnoir, André et Zwack, Peter.** *Prévision de nuages bas par les principes physiques*. Extrait du document *OASIS Progress Report*. Document interne. Montréal, Centre de recherche informatique de Montréal, 1988.

**Cotnoir, André.** *Elaboration d'une base de connaissances pour la prévision des nuages bas*. Thèse de maîtrise en cours de préparation. Université du Québec à Montréal, 1988.

**DeVerteuil, Frances et Newborn, Monroe.** *Summary Report*. Extrait du document *OASIS Progress Report*. Document interne. Montréal, Centre de recherche informatique de Montréal, 1988.

**Girard, Claude.** *Interpolation (extrapolation) à l'entrée (pression à sigma) et à ls sortie (sigma à pression) des modèles de RPN*. Document interne. Recherche en prévision numérique. 1985.

**Hobbs, Peter V. et Wallace, John M.** *Atmospheric Science. An introductory survey*. New-York, Academic Press, 1977.

**Holton, James R.** *An introduction to dynamic meteorology*. Deuxième édition. New-York, Academic Press, 1979.

**Macoosh, Asnat.** *The Blackboard*. Extrait du document *OASIS Progress Report*. Document interne. Montréal, Centre de recherche informatique de Montréal, 1988.

**Nicksen, Norman R. et Walters, John R.** *Crafting Knowledge Based Systems*. New-York, John Wiley and Sons, 1988. 342 p.

**Service de l'environnement atmosphérique.** *MANAIR- Manuel des normes de production des bulletins de prévision, des avis et des messages pour l'aviation*. Quatrième édition. Septembre 1985.

**Service de l'environnement atmosphérique.** *MANOBS- Manuel d'observations météorologiques de surface*. Septième édition. Janvier 1977.

**Servranckx, René.** *Télécommunications et systèmes d'observation*. Module 1.2 du Cours Opérationnel de Météorologie # 3. Section de formation, Centre météorologique du Québec. Novembre 1983.

**Tropper, Evelyne.** *Justification for architectural choice*. Extrait du document *OASIS Progress Report*. Document interne. Montréal, Centre de recherche informatique de Montréal, 1988.

**Vandeputte, Hugo.** *Vers une représentation des connaissances météorologiques: le développement du système expert SCAPIN*. Rapport d'un stage effectué de décembre 1986 à mai 1987. Section de formation, Service de l'Environnement Atmosphérique.

**Viau, Guy.** *Observations et codes*. Module 1.3 du Cours Opérationnel de Météorologie #3. Section de formation, Centre météorologique du Québec. Août 1983.

**Zwack, Peter.** *Reconciling Extrapolation and the Physical Principles forecaster*. Extrait du document *OASIS Progress Report*. Document interne. Montréal, Centre de recherche informatique de Montréal, 1988.

# Annexe 1

## Acquisition des données

# Introduction

La présente annexe décrit la méthode utilisée pour transférer les données météorologiques du Centre météorologique Canadien au Centre de Recherche Informatique de Montréal.

Les données utilisées par le prototype nous ont été gracieusement fournies par le Centre Météorologique Canadien (CMC), d'Environnement Canada, à Dorval. La collecte des données s'est effectuée du 26 mai au 7 juin 1988, ce qui constitue un échantillon de 12 jours. La quantité de données reçues se chiffre à 250 *megabytes*.

Avant de discuter de la méthode utilisée pour le transfert de données, nous pouvons donner une courte introduction sur le réseau informatique du CMC.

## A1.1 Organisation du réseau informatique du CMC

Le mandat du CMC est de fournir aux bureaux météorologiques répartis à travers le Canada certains produits informatiques utilisés pour la production de prévisions météorologiques. Ces produits comprennent entre autres plusieurs champs météorologiques analysés ou prévus par des modèles numériques. Le Centre assure aussi la diffusion de diverses prévisions basées sur des méthodes statistiques.

Le CMC dispose d'ordinateurs très puissants, le plus important étant le CRAY-XMP de CRAY Research Corporation. Six ordinateurs Control Data (2 CYBER-810, 2 CYBER-830 et 2 CYBER 930) sont reliés au CRAY. Les deux CYBER-930 et un CYBER-830 (MFA) sont utilisés pour des fins de recherche et de développement. Le deuxième CYBER 830 (MFB) est utilisé pour les opérations. Un CYBER 810 est utilisé pour les communications avec les autres bureaux météorologiques répartis à travers le pays. Le dernier CYBER sert d'ordinateur de remplacement advenant une panne potentielle des autres ordinateurs.

Les données utilisées par le prototype résident sur les ordinateurs MFB et sur le CRAY. Les rapports horaires sont conservés sur des disques reliés à MFB; les sorties des modèles numériques sont conservées sur des disques reliés au CRAY.

La configuration actuelle du réseau informatique du CMC ne permet pas de se connecter au CRAY en mode interactif. Il faut d'abord se connecter à un des six ordinateurs frontaux. On communique ensuite avec le CRAY au moyen de programmes FORTRAN exécutés en mode différé. Les sorties des modèles peuvent être consultées en utilisant directement les sorties des programmes (sur le fichier de sortie standard) ou des fichiers produits par les programmes.

## A1.2 Méthode utilisée pour l'acquisition des données

Le transfert de données s'est effectué par ligne téléphonique, via le réseau DATAPAC, entre le VAX 8650 du CRIM et les ordinateurs CYBER du CMC. Parce que nous avons utilisé des types de données qui ne résidaient que très peu de temps sur les ordinateurs du CMC, la collecte de données a dû s'effectuer en temps réel. Dû à l'absence d'utilités facilitant le transfert de fichiers entre les ordinateurs, ce transfert s'est effectué de façon manuelle. La figure A1.1 montre de façon schématique le lien entre les ordinateurs.

Voici comment nous avons procédé. Il existe une option sur le VAX 8650 qui permet de conserver sur disque l'information qui transite entre les ordinateurs. Le transfert de fichiers s'est effectué en donnant au CYBER MFB du CMC des instructions pour imprimer, sur un écran virtuel, les fichiers contenant les rapports horaires et les sorties de modèles.

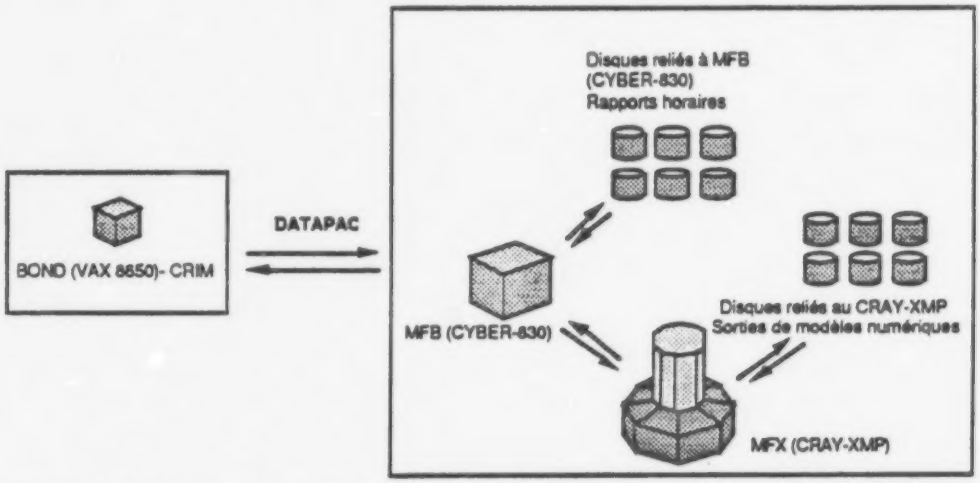



Figure A1.1 Illustration du lien entre les ordinateurs du CRIM et du CMC

Le transfert de données peut donc se résumer en six étapes.

- Connexion au VAX 8650

- Connexion au réseau DATAPAC
- Connexion à un des CYBER du CMC (MFB)
- Exécution du programme GETDATA (sur MFB) pour obtenir les rapports horaires.
- Exécution du programme PGSM[1] (sur le CRAY) et de programmes FORTRAN écrits par l'auteur pour obtenir les sorties du modèle EFR.
- Édition et impression sur écran virtuel des fichiers produits par les programmes.

[1]PGSM: Programme général de sortie des modèles, un interpolateur de grilles utilisé pour interpoler les sorties brutes du modèle sur la grille d'OASIS.

# Annexe 2

## Spécifications de la grille utilisée par OASIS

## Introduction

Environnement Canada dispose de logiciels permettant d'importer et d'exporter des champs météorologiques sur des grilles de projections cartographiques et de dimensions diverses. Avec ces logiciels, il est possible de prendre les sorties brutes du modèle et de les interpoler sur une région donnée, sur une projection cartographique autre que la projection d'origine.

Le domaine d'intégration de la version du modèle EFR utilisée par le prototype couvre l'hémisphère nord. Les sorties brutes du modèle sont définies sur une grille polaire stéréographique, ayant une résolution de 152.4 km à 60° Nord. Pour qu'OASIS puisse produire des prévisions de 24 heures pour l'aéroport de Dorval, il n'est pas nécessaire de considérer toute cette étendue. La grille utilisée par OASIS, qui sera décrite dans les prochaines sections, couvre à peine cinq pour cent de la grille du modèle. Une étendue de dimension plus réduite offre l'avantage de demander moins de ressources en espace disque et en temps de calcul.

Pour obtenir un sous-ensemble plus restreint des sorties du modèle, l'usager doit fournir aux logiciels d'Environnement Canada les spécifications suivantes:

- le type de projection cartographique désiré
- la distance entre les points de grille (qui varie selon le type de projection)
- la dimension de la grille (en points de grille)
- le méridien parallèle à l'axe des Y
- la position du pôle sur la grille

Les sections qui suivent expliquent comment ont été définis chacun de ces paramètres.

## A2.1 Projection cartographique utilisée

Il est courant en météorologie d'utiliser différents types de projection cartographique pour représenter la terre sur un plan cartésien. Un des types de projection les plus utilisés dans le domaine est la projection polaire stéréographique. C'est d'ailleurs le type de grille utilisé par le modèle EFR.

La conversion des coordonnées latitude-longitude d'un point donné en coordonnées cartésiennes (ou x-y) de la projection peut s'obtenir au moyen des relations suivantes:

$$x = \frac{m_0 r_0}{h_0} \cos(\lambda+\Delta\lambda)\sqrt{\frac{1-\sin(\phi)}{1+\sin(\phi)}} \qquad y = \frac{m_0 r_0}{h_0} \sin(\lambda+\Delta\lambda)\sqrt{\frac{1-\sin(\phi)}{1+\sin(\phi)}}$$

où

- x est la position en abscisse du point sur le plan cartésien.
- y est la position en ordonnée du point sur le plan cartésien.
- $\phi$ est la latitude du point.
- $\lambda$ est la longitude du point.
- $\Delta\lambda$ est l'angle de rotation de la grille. Cet angle de rotation permet de définir le méridien qui sera parallèle à l'axe des Y.
- $r_0$ est le rayon de la terre
- $m_0$ est le facteur d'échelle "absolu", exprimé comme étant 1 + sin ($\phi_0$), où $\phi_0$ est la latitude de référence.
- $h_0$ est la distance entre les points de grille, à la latitude de référence.

De même, on peut faire la conversion des coordonnées cartésiennes en coordonnées latitude-longitude au moyen des relations suivantes:

$$\lambda = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) - \Delta\lambda \qquad \phi = \sin^{-1}\left[\frac{\left(\frac{m_0 r_0}{h_0}\right)^2 - (x^2+y^2)}{\left(\frac{m_0 r_0}{h_0}\right)^2 + (x^2+y^2)}\right]$$

La figure A2.1 illustre comment apparaît la projection lorsque $\Delta\lambda = 0°$ et lorsque $\Delta\lambda \neq 0°$. Le pôle est situé au point (0,0).

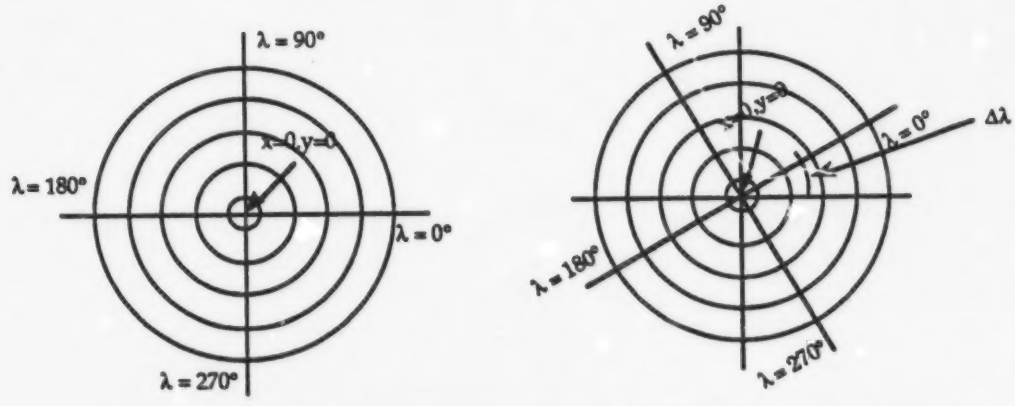



Figure A2.1 Effet de l'angle de rotation de la grille sur la projection

## A2.2 Distance entre les points de grille

Sur une projection polaire stéréographique, la distance entre les points de grilles varie avec la latitude. C'est pourquoi on définit cette distance à une latitude de référence. Pour corriger cette variation de la distance avec la latitude, on fait appel à un facteur de correction, le facteur d'échelle, défini comme étant

$$m = \frac{m_0}{1 + \sin \phi} = \frac{1 + \sin \phi_0}{1 + \sin \phi}$$

$\phi_0$ étant la latitude de référence. La distance entre les points de grille est alors donnée par la relation

$$\Delta h_\phi = \frac{\Delta h_{\phi_0}}{m}$$

$\Delta h_\phi$ et $\Delta h_{\phi_0}$ étant respectivement la distance entre les points de grille aux latitudes $\phi$ et $\phi_0$.

Le pas de grille utilisé pour la grille d'OASIS est le même que celui de la version opérationnelle du modèle EFR, soit 152.4 km à 60° Nord. Nous aurions pu utiliser un pas de grille plus fin, 100 km par exemple, mais cela n'aurait pas apporté de précision supplémentaire et aurait augmenté les besoins en espace-disque pour conserver les sorties du modèle.

## A2.3 Dimensions horizontales de la grille

Pour qu'OASIS puisse produire des prévisions de 24 heures pour Dorval, il n'est pas nécessaire de considérer toute la surface du modèle, qui couvre l'hémisphère nord. Au premier abord, on pourrait estimer que les sorties du modèle, au point de grille situé au-dessus de Dorval, fourniraient une quantité de données suffisantes pour faire des prévisions.

A ces données de base on pourrait ajouter l'information des points voisins, qui pourraient être utilisés pour calculer, au moyen de différences finies, les dérivées de certains paramètres.Ces données supplémentaires demanderaient une grille de dimension 3 x 3. Le calcul des dérivées sur la grille est illustré à la figure A2.2. L'aéroport de Dorval est au centre de la grille.

Figure A2.2 Grille nécessaire pour le calcul de dérivées spatiales

Dès les premières rencontres de l'équipe de développement d'OASIS, nous avons voulu inclure dans le système l'expertise relative à l'utilisation de différentes techniques d'extrapolation et de reconnaissance de patrons utilisées par les météorologistes opérationnels.

Pour appliquer de telles techniques, nous devons donc considérer une étendue géographique assez grande pour couvrir le déplacement des systèmes météorologiques pouvant affecter la région d'intérêt durant la période d'extrapolation.

Une technique d'extrapolation couramment utilisée en météorologie opérationnelle est la corrélation synoptique. Avec cette technique on essaie de corréler les éléments du temps, comme les zones de précipitations, avec certains objets tels les dépressions, les creux et les crêtes de pression au niveau de la mer. Les météorologistes utilisent cette méthode pour

prévoir l'heure de l'arrivée et de la fin de certains événements tels l'occurrence de précipitations, ou le taux de refroidissement de la température suite au passage d'un creux.

La figure A2.3 illustre un exemple d'application de la technique.

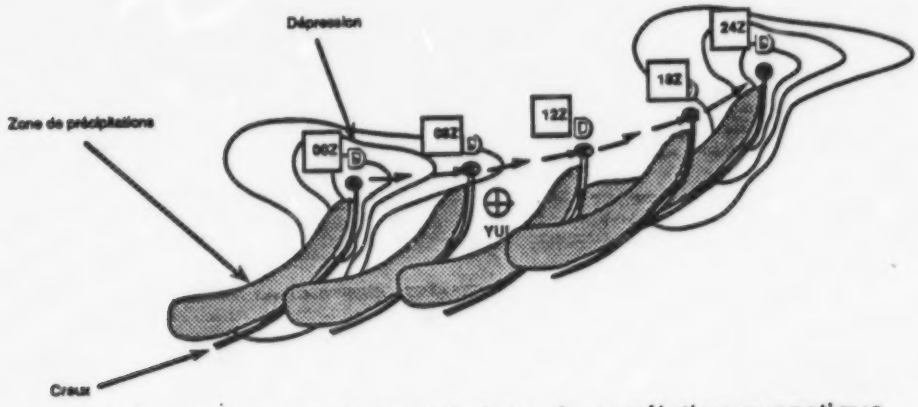



Figure A2.3 Illustration de la technique de corrélation synoptique

Suite à des discussions avec le Dr.Zwack, nous avons estimé à 75 km/hr (40 noeuds) la vitesse maximale à laquelle peuvent se déplacer les systèmes météorologiques. Nous sommes arrivés à la conclusion qu'un carré d'environ 1800 km de côté, centré sur Dorval, couvrirait une région suffisamment grande pour effectuer des extrapolations de 12 heures.

Puisque l'utilisation des méthodes d'extrapolation peut demander l'information disponible des modèles numériques, il est désirable que les sorties du modèle EFR couvrent la même étendue que la région pour laquelle nous voulons effectuer des extrapolations. Il faut donc déterminer le nombre de points de grille requis dans chaque dimension pour couvrir la région désirée.

La latitude de l'aéroport de Dorval est de 45.46° Nord. La figure A2.4 montre la variation de la distance en fonction du nombre de points de grille, dans les directions x et y à partir de l'aéroport de Dorval. Cette distance est calculée à partir de la résolution effective du modèle à la latitude de chaque point de grille. De ces graphiques, on peut évaluer à 14 le nombre de points de grille requis pour couvrir une distance de 1800 km dans les directions nord-sud et est-ouest.

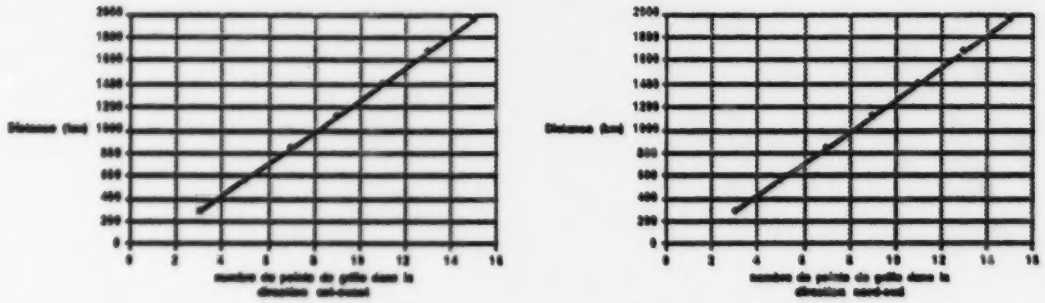


Figure A2.4 Variation de la distance, à partir de l'aéroport de Dorval, en fonction du nombre de points de grille

Pour situer l'aéroport de Dorval exactement au centre de la grille, un nombre impair de points de grille est requis. 15 étant le premier nombre impair après 14, nous pouvons conclure qu'une grille de dimension 15 x 15 est nécessaire pour couvrir la région désirée.

## A2.4 Méridien parallèle à l'axe des Y

Pour fins de symétrie, il serait souhaitable que l'axe des Y soit parallèle au méridien traversant Dorval. Pour obtenir cette orientation, il faut ajouter un angle de rotation à la grille.

En considérant les équations suivantes,

$$x = \frac{m_0 r_0}{h_0} \cos(\lambda+\Delta\lambda)\sqrt{\frac{1-\sin(\phi)}{1+\sin(\phi)}} \qquad y = \frac{m_0 r_0}{h_0} \sin(\lambda+\Delta\lambda)\sqrt{\frac{1-\sin(\phi)}{1+\sin(\phi)}}$$

on peut remarquer que pour $\lambda + \Delta\lambda = \pm 90°$, x=0 peu importe la valeur de f. On peut donc définir deux valeurs de $\Delta\lambda$. En utilisant $\lambda$ = -73.75°, qui est la longitude de Dorval, on obtient les valeurs suivantes:

$\Delta\lambda = +90 - \lambda = 163.75$
$\Delta\lambda = -90 - \lambda = -16.25.$

Une valeur de $\Delta\lambda$ = 163.75 aurait pour conséquence de présenter la grille avec le nord dirigé vers le bas de la carte, ce qui la ferait apparaître à l'envers. C'est donc la dernière valeur de $\Delta\lambda$, soit -16.25, qui a été conservée. La figure A2.5 illustre l'effet de cette rotation.

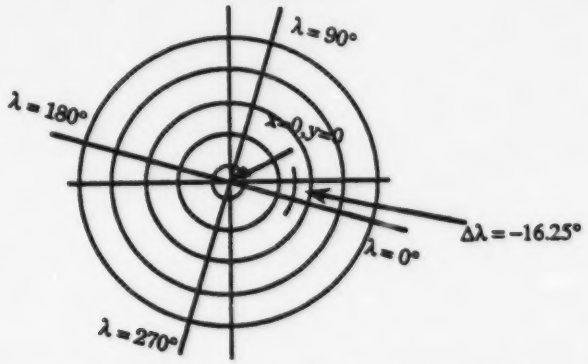



Figure A2.5 Angle de rotation de la grille nécessaire pour rendre l'axe Y parallèle au méridien de Dorval .

## A2.5 Position du pôle sur la grille

Le dernier paramètre à définir est la position du pôle sur la grille. En appliquant les équations de la section A2.1, on peut calculer les coordonnées cartésiennes du pôle nord et des extrémités de la grille, tel qu'illustré à la figure A2.6. L'aéroport de Dorval est au centre de la grille.

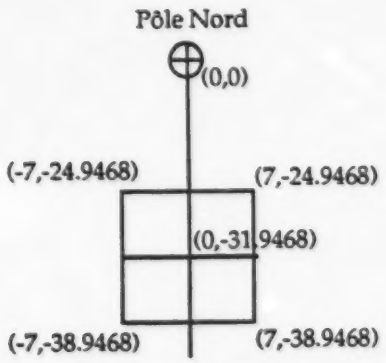



Figure A2.6 Position du pôle sur la grille avant translation des coordonnées

La prochaine étape consiste à effectuer une translation des coordonnées afin que la coordonnée du coin inférieur gauche de la carte soit (0,0) ou (1,1). L'origine (0,0) est utilisée par OASIS; cependant les logiciels d'Environnement Canada demandent que le point d'origine soit (1,1). De cette translation on peut obtenir directement les coordonnées du pôle sur la grille, qui sont (x =0, y = 38.9468) ou (x=1, y= 39.9468), selon l'origine de la grille, tel qu'indiqué à la figure A2.7.

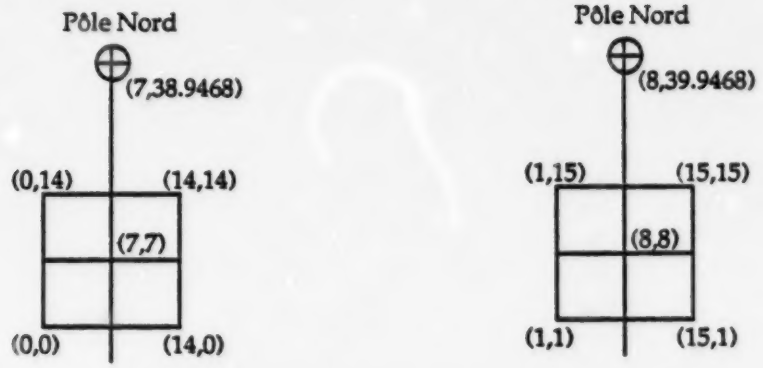



Figure A2.7 Position du pôle sur la grille après translation des coordonnées

En appliquant les diverses transformations mentionnées dans les paragraphes précédents, nous obtenons la grille présentée à la figure A2.8.

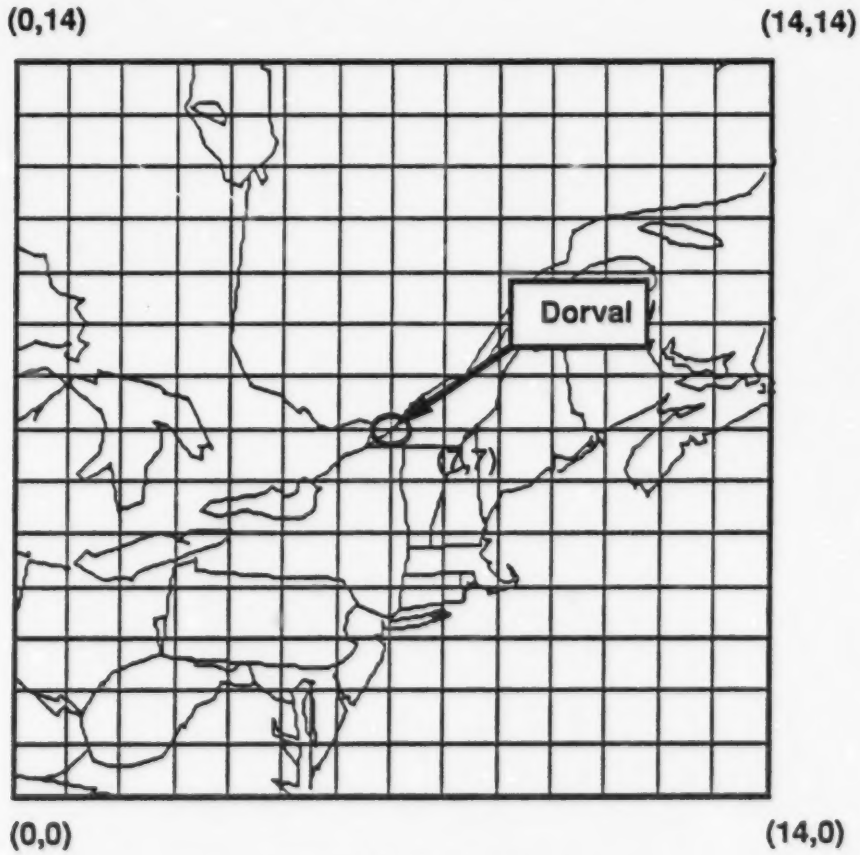



Figure A2.8 Grille d'OASIS

## A2.6 Validation des paramètres de la grille

La validation des paramètres de la grille peut se faire par comparaison visuelle de cartes. Nous avons d'une part des cartes, qui ont été tracées sur un Macintosh par un programme PASCAL écrit par l'auteur, et d'autre part des cartes émises par Environnement Canada sur fac-similé. Les paramètres de la grille seront considérées valides si les contours des champs sont identiques sur les deux cartes.

La figure A2.9 montre un exemple de carte émise par Environnement Canada, pour le cas du 3 juin 1988 à 00H00 TUC. Cette carte montre la prévision de 00 heure des champs de pression au niveau de la mer et de l'épaisseur entre 1000 et 500 millibars. Cette carte (de même que celle de la figure A2.10) a été utilisée par les météorologistes du Centre météorologique du Québec, c'est pourquoi elles ont été quelque peu griffonnées. La figure A2.10 montre la même carte, telle que définie sur la grille d'OASIS. Cette carte a été tracée sur un Macintosh par un programme écrit en PASCAL par l'auteur. Une analyse des contours montre que ceux-ci sont effectivement identiques pour les régions géographiques communes aux deux cartes. Les contours d'une valeur donnée passent par les mêmes repères géographiques. On remarque, par exemple, que le contour de la valeur 1012 millibars passe par la pointe sud de la frontière entre le Maine et le Nouveau-Brunswick et continue vers le nord pour toucher la pointe ouest de l'île d'Anticosti, et ce dans les deux cartes.

Les figures A2.11 et A2.12 montrent des cartes de la prévision de 12 heures du champ de pression au niveau de la mer, la première, telle qu'émise par Environnement Canada, la seconde, telle que définie sur la grille d'OASIS. L'analyse des contours montre que le champ de pression au niveau de la mer a une configuration identique sur les deux cartes.

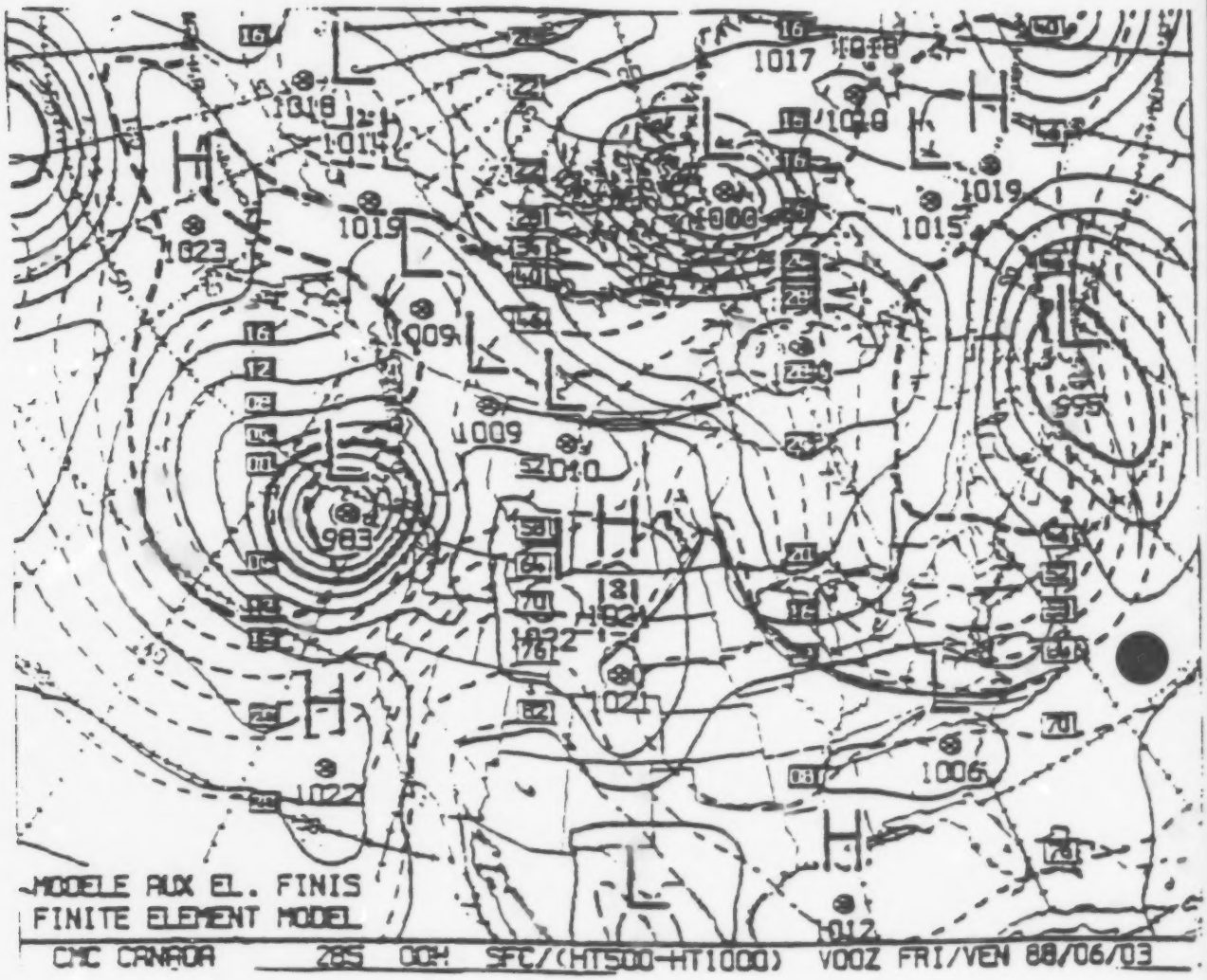



Figure A2.9 Prévision de 00 heures du champ de pression au niveau de la mer, tel qu'émise par Environnement Canada

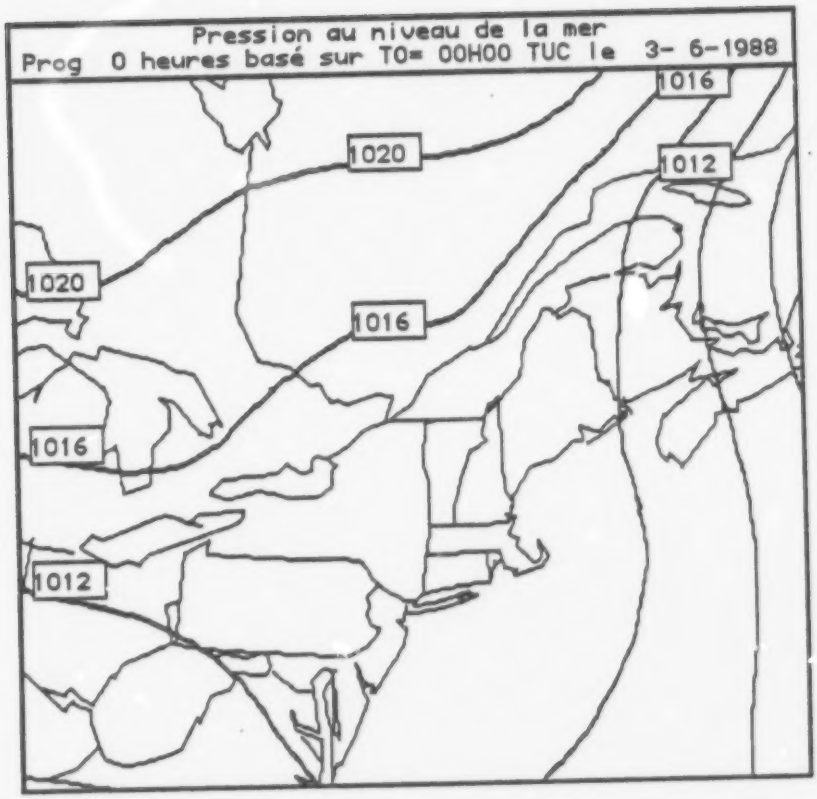



Figure A2.10 Prévision de 00 heures du champ de pression au niveau de la mer, tel que définie sur la grille d'OASIS.

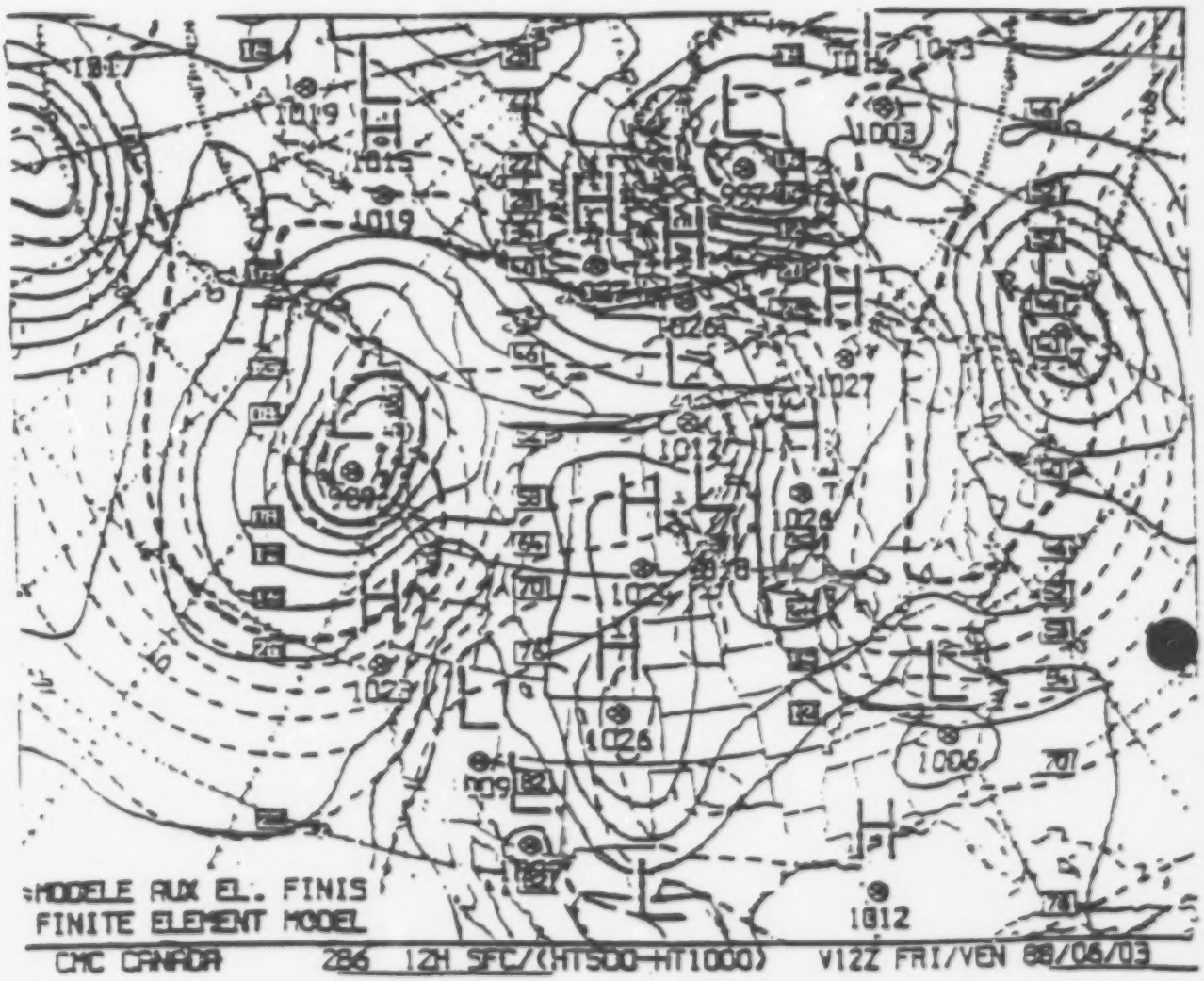



Figure A2.11 Prévision de 12 heures du champ de pression au niveau de la mer, tel qu'émise par Environnement Canada

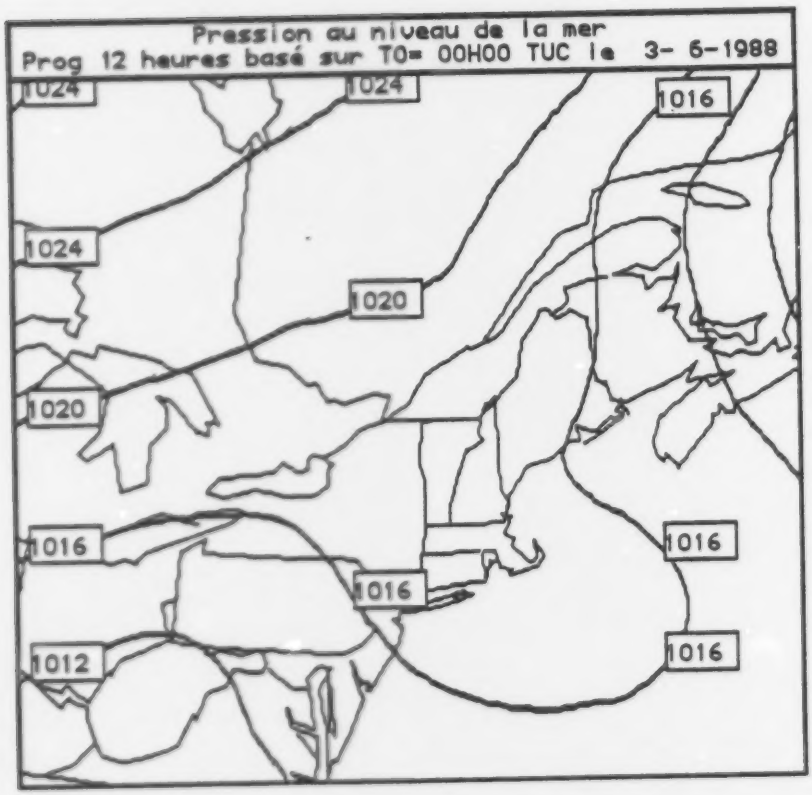



Figure A2.12 Prévision de 12 heures du champ de pression au niveau de la mer, tel que définie sur la grille d'OASIS.

# Annexe 3

## Conversion des sorties du modèle EFR de coordonnées sigma en coordonnées de pression

## Introduction

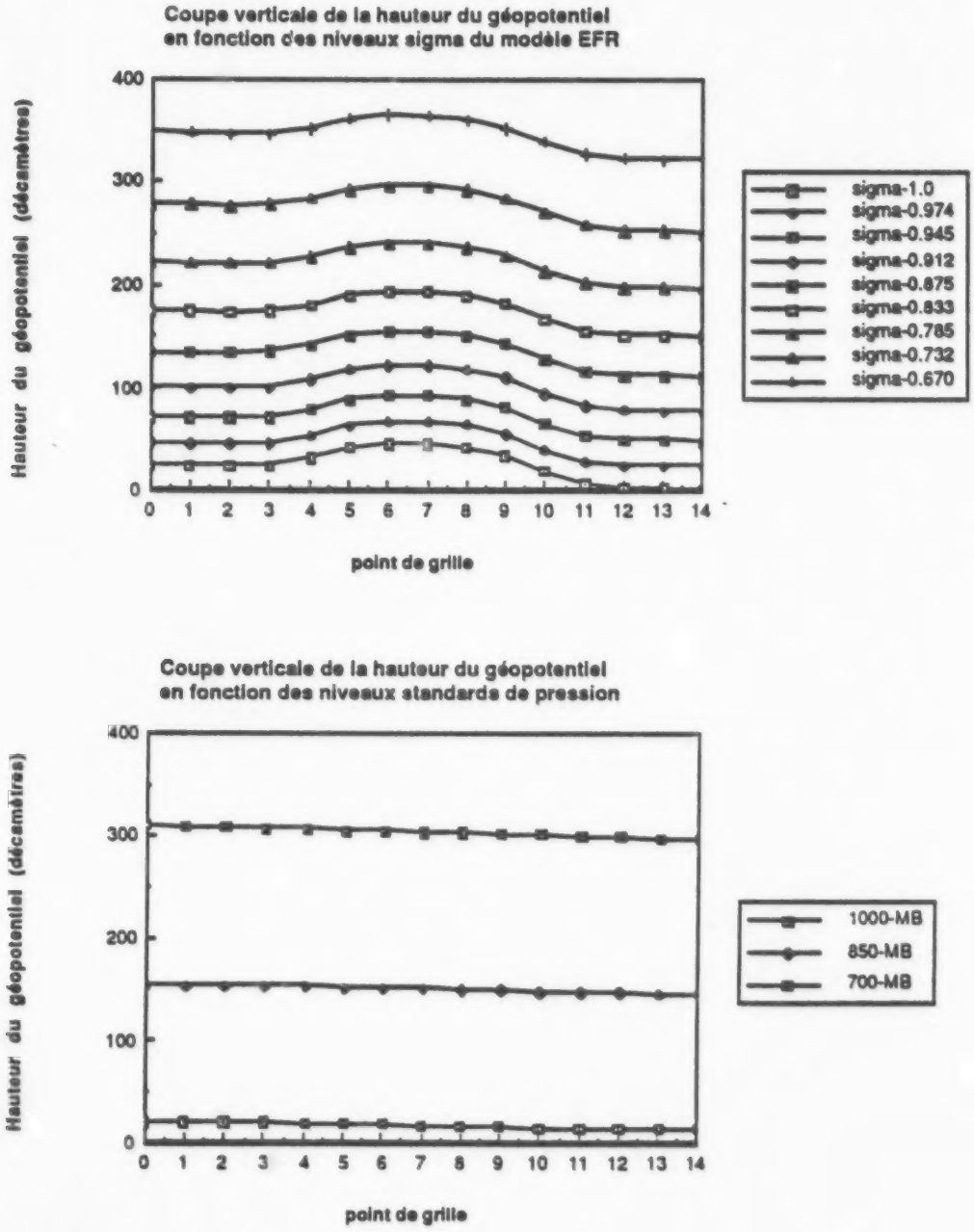
Le présent document décrit la méthode utilisée pour convertir les sorties du modèle des cordonnées σ en coordonnées de pression. Cette méthode est essentiellement inspirée d'un document interne du Dr. Claude Girard [Girard, 85], chercheur scientifique à la division de Recherche en prévision numérique, d'Environnement Canada, à Dorval.

## A3.1 Description du problème

Au dessus d'un point donné, il n'y a généralement pas de correspondance entre les niveaux σ et les niveaux de pression standards. Le niveau de pression correspondant à un niveau σ est fonction de la topographie et de la pression locale à la surface, qui change continuellement dans le temps. Pour obtenir, à des niveaux standards, des valeurs de certains champs qui ne sont disponibles qu'en coordonnées σ, une interpolation des valeurs des variables dans la verticale est alors nécessaire. La figure A3.1 illustre ce processus de conversion.

Les deux diagrammes montrent une coupe verticale de la hauteur du géopotentiel, tirée d'une prévision de 12 heures du modèle EFR, initialisée le 2 juin à 12h00 TU. Cette coupe couvre une ligne de points de la grille d'OASIS allant des coordonnées (7,0) à (7,14). En faisant référence à la grille d'OASIS (figure A2.9 de l'annexe II), cette ligne s'étend de l'extrémité nord-ouest du lac Michigan jusqu'à l'extrémité sud-est de la Nouvelle-Ecosse.

Nous avons sur la partie supérieure de la figure A3.1 les sorties du modèle avant interpolation, et sur la partie inférieure, après interpolation aux niveaux standards de pression. Le niveau sigma 1.0 correspond à la topographie; il est à remarquer que d'après les sorties du modèle en coordonnées sigma, Nous pouvons constater que l'influence de la topographie sur la distribution des hauteurs a disparu.

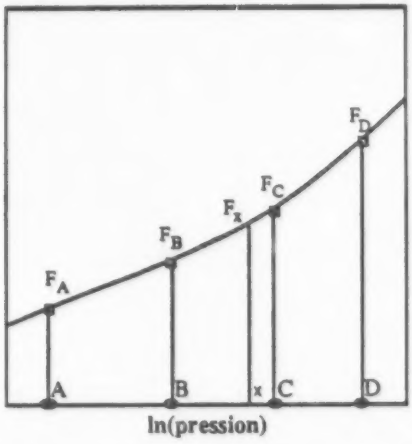



.c1.Figure A3.1 Illustration du processus de conversion des sorties du modèle de coordonnées sigma en coordonnées de pression

## A3.2 Conversion de coordonnées

### A3.2.1 Méthode d'interpolation

La méthode d'interpolation utilisée est de type Hermite, d'ordre cubique, par morceau. On interpole la valeur d'une fonction F au point x, en supposant connues les valeurs de la fonction ainsi que de sa première dérivée aux points C et D. La figure 2 illustre la distribution des points. F peut être toute variable atmosphérique qui varie dans la verticale.




.c1.Figure A3.2 Illustration de la fonction d'interpolation

Pour les fins de l'interpolation, on utilise comme variable indépendante $x = \ln(\sigma p_s) = \ln(p)$, $p = \sigma p_s$ étant la pression atmosphérique à un niveau donné.

En utilisant les définitions suivantes:

$$B \le x \le C$$

$$\Delta h = C - B$$

$$y = x - \frac{B + C}{2}$$

$$F_x = F(x) = f(y) = ay^3 + by^2 + cy + d$$

$$F'_x = F'(x) = f'(y) = 3ay^2 + 2by + c$$

il est possible de démontrer que

$$F_x = F_B + (x - B)\left(\frac{F_C - F_B}{\Delta h}\right) + \frac{1}{2}(x - B)(x - C)\left[\frac{F'_C - F'_B}{\Delta h} + k[(x - B) + (x - C)]\right]$$

$$F'_x = F'_B + (x - B)\left(\frac{F'_C - F'_B}{\Delta h}\right) + 3k(x - B)(x - C)$$

où

$$k = \frac{2}{\Delta h^2}\left(\frac{F'_B + F'_C}{2} - \frac{F_C - F_B}{\Delta h}\right)$$

### A3.2.2 Domaine d'interpolation

Les sorties du modèle sont disponibles pour N=19 niveaux σ. Dans le cas du modèle EFR, $\sigma_1$=0.05 et $\sigma_N$=1.0. Un point x compris entre les niveaux $\ln(\sigma_2 p_s)$ et $\ln(\sigma_{N-1} p_s)$ inclusivement est considéré comme étant à l'intérieur du domaine d'interpolation. Si ce point est entre les niveaux $\ln(\sigma_1 p_s)$ et $\ln(\sigma_2 p_s)$, ou entre les niveaux $\ln(\sigma_{N-1} p_s)$ et $\ln(\sigma_N p_s)$, il est alors considéré comme étant aux frontières du domaine. Un point hors de ces limites est considérées hors du domaine.

### A3.2.3 Interpolation à l'intérieur du domaine

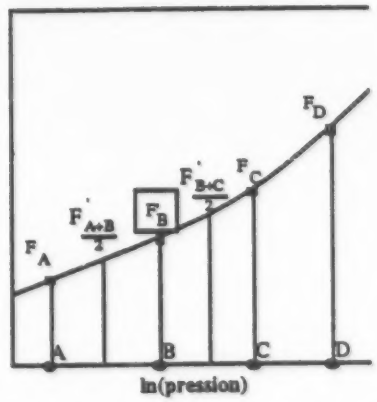
Puisque la fonction F est inconnue, on évalue $F'_B$ et $F'_C$ numériquement au moyen de différences finies d'ordre 2. Il nous faut alors 4 points pour effectuer l'interpolation.

Les niveaux σ n'étant pas espacés uniformément dans la verticale, il faut d'abord calculer les dérivées aux points $\frac{A+B}{2}$, $\frac{B+C}{2}$ et $\frac{C+D}{2}$. On calcule d'abord $F'_B$ au moyen des relation suivantes.

$$F'_{\frac{A+B}{2}} = \frac{F_B - F_A}{B - A} \qquad F'_{\frac{B+C}{2}} = \frac{F_C - F_B}{C - B}$$

$$F'_B = \frac{(C - B)\,F'_{\frac{A+B}{2}} + (B - A)\,F'_{\frac{B+C}{2}}}{(C - A)}$$

L'expression pour $F'_B$ est en fait l'expression de l'ordonnée à l'origine lorsque l'on suppose une variation linéaire de F'(x) entre les points $\frac{A+B}{2}$ et $\frac{B+C}{2}$. La figure A3.3 illustre ce calcul.

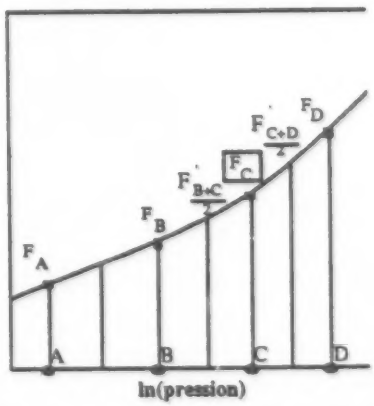



.c1.Figure A3.3 Illustration de l'évaluation numérique de $F'_B$

De façon similaire, nous pouvons évaluer $F'_C$ au moyen des relations suivantes. Le calcul est illustré à la figure A3.4.

$$F'_{\frac{B+C}{2}} = \frac{F_C - F_B}{C - B} \qquad F'_{\frac{C+D}{2}} = \frac{F_D - F_C}{D - C}$$

$$F'_C = \frac{(D - C)\, F'_{\frac{B+C}{2}} + (C - B)\, F'_{\frac{C+D}{2}}}{(D - B)}$$




.c1.Figure A3.4 Illustration de l'évaluation numérique de $F'_C$

Lorsqu'on est aux frontières ou à l'extérieur du domaine, les quatre points utilisés pour l'interpolation ne sont pas disponibles. Les deux prochaines sections décrivent les méthodes utilisées pour contourner ce problème.

### A3.2.4 Interpolation aux frontières du domaine

Lorsque la variable à interpoler est aux frontières du domaine, on pose les approximations suivantes.

$F'_D = \frac{F'_{C+D}}{2}$ lorsque le point x est entre $\ln(\sigma_1 p_s)$ et $\ln(\sigma_2 p_s)$

$F'_A = \frac{F'_{A+B}}{2}$ lorsque le point x est entre $\ln(\sigma_{N-1} p_s)$ et $\ln(\sigma_N p_s)$.

### A3.2.5 Extrapolation hors du domaine

On extrapole hors du domaine en utilisant les relations suivantes.

$F_X = F_A$ lorsque $x < \ln(\sigma_1 p_s)$

$F(x) = F_D + 0.5\,(x - D)\,(F'_D + F'_x)$ lorsque $x > \ln(\sigma_N p_s)$, et où

$$F'_X = F'_D + (x - D)\,\frac{F'_D - F'_C}{D - C} \text{ en approximant } F'_D = \frac{F'_{C+D}}{2}$$

# DÉVELOPPEMENT D'UN MODULE CALCULANT LES FLUX DE CHALEUR ET LA TURBULENCE DANS LA COUCHE DE SURFACE POUR LE PROJET STRATUS

PAR

NATHALIE GAUTHIER

Ce travail est une version préliminaire d'une thèse de maîtrise qui sera présentée au Département de physique de l'Université du Québec à Montréal

# LISTE DES FIGURES

Page

Fig. 1 Schéma des différents flux impliqués dans le bilan d'énergie à l'interface sol-atmosphère . La direction des flux ainsi que le signe correspondant y sont représentés..... 7

Fig. 2 Schéma représentant les flux de chaleur dans le couvert et à l'extérieur..... 15

Fig. 3 Rayonnement net et ses composantes calculés à partir (a) de la version non modifiée du programme (nommée temporairement test.for) (b) de la version où la paramétrisation du couvert nuageux a été modifiée (nommée temporairement surprise.for)..... 19

Fig. 4 Selon la version modifiée et pour la journée du 3 juin 1988 on a (a) le rayonnement net et ses composantes (b) les températures à l'abri et du sol..... 22

Fig. 5 Version modifiée, 3 juin 1988. Évolution dans le temps de l'humidité spécifique à l'abri (QA) et au sol (QG)..... 23

Fig. 6 Version modifiée, 3 juin 1988. Évolution dans le temps(a) des flux de chaleur sensible et latente et du transfert d'énergie dans le sol (énergie net au sol) (b) du nombre de Richardson..... 24

Fig. 7 Vitesse du vent telle que mesurée horairement au niveau de l'anémomètre pour une période de 24 heures à partir de 19 heures (heure locale) le 3 juin 1988..... 25

Fig. 8 Évolution temporelle du flux de chaleur sensible selon le modèle SURFACE.FOR (couvert végétal inclus) (••••) comparé au flux de chaleur sensible selon le modèle de Deardoff (••••)..... 28

Fig. 9

Selon la dernière version du modèle, incluant la paramétrisation d'un couvert végétal, est représentée l'évolution temporelle des températures de l'air à l'abri (TA) et dans le couvert végétal (TAF), du feuillage (TF) et du sol (TG)..... 29

Fig. 10

Selon la dernière version du modèle, comprenant la paramétrisation d'un couvert végétal, sont représentées: (a) la température du sol (TG) calculée et mesurée et (b) la différence entre la température du sol et la température de l'air dans le couvert (TAF) calculée et mesurée..... 30

Fig. 11

Selon la dernière version du modèle, comprenant la paramétrisation d'un couvert végétal, sont représentés les flux de chaleur sensible (HSH) et latente (EHL): (a) dans le cas où il n'y a pas de précipitation et (b) dans le cas de la simulation d'une pluie de 5 mm/hre de 18 hres à 22 hres..... 31

# LISTE DES SYMBOLES

| | |
|---|---|
| $q_a$: | humidité spécifique au niveau de l'abri |
| $q_s$: | humidité spécifique au niveau du sol |
| RN: | flux radiatif net |
| Q: | flux de chaleur sensible |
| EL: | flux de chaleur latente |
| S: | transfert d'énergie dans le sol par conduction |
| RIB: | nombre de Richardson |
| $\rho_a$: | densité de l'air sec |
| $c_u$ et $c_t$: | coefficients de transfert turbulent mécanique et thermique |
| $v_a$: | vitesse du vent à l'abri |
| $C_1$ et $C_2$: | coefficients dépendant du type de sol |
| $\tau_1$: | période (24 hres) |
| $\rho_w$: | densité de l'eau |
| $d_1$: | profondeur du cycle diurne de l'humidité |
| $d_2$: | profondeur au-dessous de laquelle le flux d'humidité est négligeable |
| P: | taux de précipitation se rendant au sol |
| $\alpha$: | $\min(1, w_g/w_{max})$ |
| $w_{max}$: | contenu en eau maximal pouvant être contenu dans le sol sans qu'il y est ruissellement |
| RS↓: | rayonnement solaire incident |
| RS↑: | rayonnement solaire réfléchi par la surface |
| RL↓: | rayonnement atmosphérique incident |
| RL↑: | rayonnement terrestre |
| $c_p$: | capacité thermique de l'air sec |
| $\varepsilon$: | émissivité du nuage (=1) |
| $\sigma$: | constante de Stephan-Boltzman |
| $T_n$: | température du nuage |
| L: | coefficient de chaleur latente à vaporisation |

| | |
|---|---|
| $\sigma_f$: | facteur caractérisant la densité du couvert végétal |
| qsat(Tf): | humidité spécifique à saturation évaluée à $T_f$ |
| $r_s$: | résistance stomatale des feuilles |
| $r_a$: | résistance aérodynamique de l'air dans le couvert |
| r': | fraction du taux d'évaporation potentiel qui est évaporé en réalité. |
| $W_{dew}$: | contenu d'eau condensée sur les feuilles |
| $W_{dmax}$: | contenu d'eau maximal condensable sur les feuilles |
| $\alpha_g$: | albedo de la surface du sol |
| $\varepsilon_s$: | émissivité du sol |
| $\varepsilon_f$: | émissivité de la feuille |
| $E_h$: | taux d'évaporation vu au-dessus du couvert (i.e. au niveau z=h) |
| $E_g$: | taux d'évaporation au-dessus du sol |
| $H_{Sh}$: | flux de chaleur sensible vu au-dessus du couvert |
| $H_{Sg}$: | flux de chaleur sensible au-dessus du sol |
| $l_v$: | chaleur latente de vaporisation |
| $R_v$: | constante des gaz pour l'air |
| $P_g$: | taux de précipitation se rendant au sol |

# TABLE DES MATIÈRES

OBJECTIFS ..... 2
MATÉRIEL ET MÉTHODE ..... 4
a) Matériel ..... 4
b) Méthode ..... 4
DESCRIPTION DU MODÈLE ET DES MODIFICATIONS APPORTÉES ..... 6
a) Description du modèle SURFACE.FOR ..... 6
b) Paramètres d'entrée du programme initial ..... 10
c) Modifications apportées à SURFACE.FOR ..... 11
i) Paramétrisation du couvert nuageux ..... 11
ii) Calcul du rayonnement long émis par les nuages ..... 12
iii) Introduction d'un couvert végétal dans le modèle ..... 14
PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION ..... 16
a) Quelques notions nécessaires à l'interprétation des résultats ..... 16
b) Résultats ..... 18
i) Paramétrisation du rayonnement long émis par les nuages ..... 18
ii) Cas du 3 juin 1988 ..... 20
iii) Paramétrisation du couvert végétal ..... 26
RECOMMANDATIONS ..... 32
CONCLUSION ..... 34
BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCE ..... 35
Annexe 1 ..... 36
ORGANIGRAMME DE LA VERSION INITIALE
Annexe 2 ..... 46
PARAMÉTRISATION DU COUVERT VÉGÉTAL SELON DEARDOFF (1978)
Annexe 3 ..... 60
NOUVEAUX PARAMÈTRES D'ENTRÉE DE SURFACE.FOR ..... 62
ORGANIGRAMME DE LA NOUVELLE VERSION DE SURFACE.FOR INCLUANT LA PARAMÉTRISATION DU COUVERT VÉGÉTAL ..... 63

## OBJECTIFS

Les objectifs du travail que j'ai accompli dans le cadre de mon stage au CRIM ne sont pas encore intégrés à STRATUS, ils le seront dans une phase ultérieure.

Ma tâche consistait à développer un module permettant de calculer le bilan énergétique à l'interface sol-atmosphère. Nous sommes, en particulier, intéressés par les échanges de chaleur afin d'estimer la turbulence de l'air dans la couche limite atmosphérique (CLA) et éventuellement la hauteur de cette couche. La couche limite atmosphérique est la région turbulente dans laquelle l'atmosphère et la lithosphère échangent des quantités physiques de façon importante. C'est la région où la surface de la terre exerce une influence significative sur les paramètres météorologiques et l'écoulement. La hauteur de la couche limite varie d'heure en heure et la connaissance de sa valeur est importante dans l'évaluation de la hauteur des nuages bas. Actuellement STRATUS utilise une valeur constante pour la hauteur de la couche limite et suppose une atmosphère toujours instable, donc très turbulente et bien mélangée. Certaines règles concernant ces paramètres sont actuellement en cours de développement par l'expert prévisionniste et le cogniticien. Elles trouvent leur source dans l'expérience du prévisionniste quant à l'évaluation du bilan énergétique mais seront éventuellement basées sur des calculs plus précis provenant du module mentionné plus haut.

Pour développer ce module, un modèle existant, qui modélise la couche de surface (sous-couche de la CLA), programmé en FORTRAN standard 77, fut utilisé comme point de départ.

Les objectifs de mon stage tels que définis par mon professionnel associé étaient les suivants.

- Me familiariser au système expert STRATUS.
- Transférer le modèle de couche de surface SURFACE.FOR de l'ordinateur AMDAHL de l'université du Québec à Montréal au VAX/VMS du CRIM.
- Améliorer SURFACE.FOR en intégrant la paramétrisation d'un couvert végétal et en modifiant la paramétrisation du couvert nuageux.
- Participer aux réunions hebdomadaires de l'équipe de développement de STRATUS.
- A la fin du stage, faire une présentation de la nouvelle version du modèle au directeur du projet, chercheur au Service de l'environnement atmosphérique.

## MATÉRIEL ET MÉTHODE

Comme mentionné précédemment, le programme fut transféré de l'ordinateur AMDAHL de l'UQAM au micro-VAX du CRIM. Quelques modifications mineures ont dû être apportées au code FORTRAN afin qu'il puisse fonctionner sur le VAX qui lui aussi supporte le FORTAN 77. Il faut mentionner qu'il m'a fallu apprendre le langage FORTRAN et le système d'exploitation du VAX.

### a) Matériel

- Micro-ordinateur VAX/VMS - Utilisé pour développer le programme.
- Micro-ordinateur Macintosh SE - Utilisé pour sortir les résultats sur graphiques. Un logiciel de communication, PacerLink, transfère les données d'un ordinateur à l'autre.
- Articles scientifiques; Deardoff (1978) et Penman and Long (1960), et notes du cours "Couche-limite et micrométéorologie", UQAM.

### b) Méthode

- Écrire l'algorithme des modifications à apporter. Coder l'algorithme en FORTRAN.
- Compiler et exécuter le programme.
- Sortir sur graphiques les résultats.
- Comparer les résultats de la nouvelle version à ceux de l'ancienne version.

En ce qui concerne l'inclusion d'un couvert végétal dans le modèle, les résultats sont comparés à ceux présentés par l'auteur de la paramétrisation du couvert végétal dans son article (Deardoff ,1978). Les tests de l'auteur et de moi-même ont été faits en simulant les conditions atmosphériques (paramètres d'entrée) reportées par Penman et Long (1960) à l'intérieur d'un couvert relativement dense ($\sigma_f = 0.75$) d'avoine en Angleterre les 4 et 5 juin 1955. Les mesures servant à comparer certains résultats avec la réalité proviennent du même article de Penman and Long (1960).

## DESCRIPTION DU MODÈLE ET DES MODIFICATIONS APPORTÉES

Avant de présenter les modifications apportées au programme SURFACE.FOR, il est nécessaire de décrire les différentes composantes du modèle. Un organigramme du programme est fourni à l'annexe 1.

### a) Description du modèle SURFACE.FOR

Le programme modélise la couche de surface. Celle-ci est une sous-couche de la couche limite atmosphérique et s'étend sur environ 100 mètres de hauteur. Elle est caractérisée par des flux verticaux turbulents (diffusion de certaines propriétés par la turbulence) de chaleur et de quantité de mouvement quasi constants avec l'altitude.

Dans sa version initiale:

*Le programme calcule (diagnostique) au niveau de l'interface sol-atmosphère:*

- Le flux radiatif net et ses composantes (RN).
- Le flux de chaleur sensible (Q).
- Le flux de chaleur latente (EL).
- Transfert d'énergie dans le sol par conduction (S).
- L'humidité spécifique au niveau de l'abri et au sol ($q_a$ , $q_s$).
- Le nombre de Richardson global (paramètre de stabilité) (RIB).

Ces paramètres sont illustrés à la figure 1.

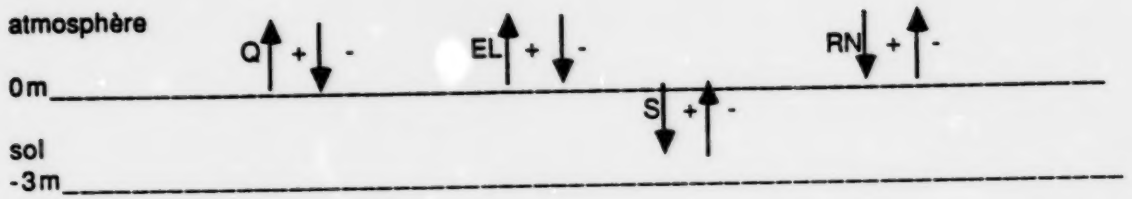



**Fig. 1:** Schéma des différents flux impliqués dans le bilan d'énergie à l'interface sol-atmosphère. La direction des flux ainsi que le signe correspondant y sont représentés.

*Le programme prédit:*

- La température du sol pour 50 niveaux, de la surface à 2.75 mètres en profondeur.
- Le contenu en eau dans le sol à deux niveaux, soit à la surface et en profondeur (≈ 2 mètres).

La température du sol est prédite par l'équation de diffusion de chaleur dans le sol, qu'on résout numériquement.

$$C\,\partial T_g/\partial t = \partial/\partial z(\lambda\,\partial T_g/\partial z)$$

C : capacité thermique du sol

$\lambda$ : conductivité thermique du sol

$T_g$ : température du sol

Le contenu en eau est prédit à l'aide du système d'équations suivant:

$$\partial w_g/\partial t = -C_1(E-P)/\rho_w d_1 - C_2(w_g-w_2)/\tau_1 \qquad 0 \le w_g \le w_{max}$$

$$0 \le w_2 \le w_{max}$$

$$\partial w_2/\partial t = -(E-P)/\rho_w d_2$$

$$E = \rho_a c_u c_t v_a (q_g - q_a)$$

$$q_g = \alpha q_{sat}(T_g) + (1-\alpha) q_a$$

$w_g$ : contenu en eau du sol à la surface

$w_2$ : contenu moyen en eau pour la couche profonde (de 5 cm à 2 mètres)

E : taux d'évaporation

$\rho_a$ : densité de l'air sec

$c_u$ et $c_t$ : coefficients de transfert turbulent mécanique et thermique

$v_a$ : vitesse du vent à l'abri

$C_1$ et $C_2$ : coefficients dépendant du type de sol

$\tau_1$ : période (24 hres)

$\rho_w$ : densité de l'eau

$d_1$ : profondeur du cycle diurne de l'humidité

$d_2$ : profondeur au-dessous de laquelle le flux d'humidité est négligeable

P : taux de précipitation se rendant au sol

$\alpha$ : $\min(1, w_g/w_{max})$

$w_{max}$ :contenu en eau maximal pouvant être contenu dans le sol sans qu'il y est ruissellement

Le bilan d'énergie à l'interface terre-atmosphère s'exprime par l'équation suivante:

$$RS\downarrow - RS\uparrow + RL\downarrow - RL\uparrow = \pm RN = \pm S \pm Q \pm EL$$

$RS\downarrow$ : rayonnement solaire incident

$RS\uparrow$ : rayonnement solaire réfléchi par la surface

$RL\downarrow$ : rayonnement atmosphérique incident

$RL\uparrow$ : rayonnement terrestre

Ceci correspond au principe de conservation d'énergie.

Le flux de chaleur sensible est calculé de la façon suivante:

$$Q = \rho_a c_p c_u c_t v_a (T_g - T_a)$$

$c_p$ : capacité thermique de l'air sec

$T_a$ : température de l'air

Pour obtenir le flux de chaleur latente, on multiplie E par la chaleur latente de vaporisation, L.

### b) Paramètres d'entrée du programme initial

Le fichier d'entrée contient:

*Les données de caractérisation du sol suivantes:*

- Le jour, le mois et l'heure du début de la simulation
- La latitude de la station
- L'albedo, l'émissivité et la hauteur de rugosité de la surface
- Dix valeurs de température dans le sol et les niveaux associés ( z=0 à z=-3m).
- Le contenu en eau dans le sol (surface et profondeur)

*Et les données horaires suivantes, pour 24 heures:*

- Le taux de précipitation (P)
- Le couvert nuageux en dixième et le type (CPRIM)
- La température à l'abri ($T_a$)
- La température du point de rosée à l'abri ($T_d$)
- La pression au sol (PO)
- La vitesse horizontale du vent au niveau de l'anémomètre ($V_a$)

Dans le programme, à l'endroit indiqué, on doit fournir:

- Une expression pour la conductivité thermique en fonction du contenu en eau et de la profondeur ($\lambda$)
- Une expression pour la capacité thermique en fonction du contenu en eau et de la profondeur (C)

Les données horaires du fichier d'entrée proviennent des observations horaires des stations météorologiques dans les cas où l'on se sert du modèle à des fins pédagogiques ou de recherche et des sorties du modèle numérique EFR, sauf pour le couvert nuageux, dans le contexte de STRATUS.

Pour caractériser le sol, on utilise actuellement les valeurs fournies dans un cahier du CMC intitulé "Notes scientifiques et techniques". Les fonctions utilisées pour la capacité et la conductivité sont encore arbitraires et devront éventuellement être modifiées.

### c) Modifications apportées à SURFACE.FOR

#### i) *Paramétrisation du couvert nuageux*

Dans la version originale, la paramétrisation du couvert nuageux ne permettait pas de considérer tous les nuages présents dans l'atmosphère lors des calculs de la transmittance des nuages et du rayonnement long émis par les nuages. Dans chaque niveau de nuages: bas, moyen et haut, on peut retrouver plusieurs types de nuages à des hauteurs différentes. Par exemple, au niveau bas on peut retrouver du nimbostratus, du cumulus, etc. Cependant,

pour chaque niveau, le programme ne retient que la couche de nuage possédant la plus grande étendue horizontale. Par exemple, dans la couche de nuages bas 3/10 du ciel pourrait être couvert par du stratocumulus et 2/10 par du nimbostratus et seule la couche de stratocumulus serait retenue par le modèle et le 2/10 de nimbostratus serait négligé. Ceci amenait une sous-estimation du rayonnement long émis par le couvert nuageux total et une sur-estimation de la ttransmittance du couvert nuageux total. La version actuelle tient maintenant compte de toutes les couches possibles de nuages pour chaque niveau.

Mentionnons aussi que la version initiale exigeait que l'on fournisse dans le fichier d'entrée des valeurs corrigées du couvert nuageux pour chaque type. La correction à apporter tient compte du fait qu'une certaine quantité de nuages peut être cachée par la couche qui lui est inférieure. Maintenant le programme calcule cette correction et trois sous-routines ont été ajoutées à cette fin (TRIE, CORRI1 et CORRI2).

ii) *Calcul du rayonnement long émis par les nuages*

La version initiale calculait le rayonnement long émis par les nuages, en multipliant le couvert nuageux total (somme de tous les nuages observables à partir de la terre) par une constante. Or, on sait que les nuages émettent comme des corps noirs, donc en fonction de leur température. Sachant que des nuages à des hauteurs différentes ne possèdent pas tous la même température il est évident que l'ancien calcul ne s'applique pas formellement, bien qu'il soit une approximation raisonnable.

*Version initiale:*

$$RL = 60 \ (w/m^2) \times \text{couvert total}$$

*Version actuelle:*

$$RL = \sum 0.3 \ \varepsilon \ \sigma \ (T_n^4) \times \text{couvert d'un type de nuage}$$

$\varepsilon$ : émissivité du nuage (=1)

$\sigma$ : constante de Stephan-Boltzman

$T_n$ : température du nuage

Le facteur de 0.3 provient du fait que les nuages introduits comme corps noirs affectent le rayonnement long reçu au sol seulement que par leur contribution au rayonnement dans la fenêtre atmosphérique. En effet seuls les nuages peuvent absorber et émettre dans ces longueurs d'ondes et ce qu'ils émettent dans les autres longueurs d'ondes est calculé ailleurs selon la température de l'atmosphère.

Lorsque non disponible, le programme calcule la température du nuage à partir de la hauteur de celui-ci et de la température au sol en faisant l'hypothèse que la température décroît selon une atmosphère standard. Suivant le cas où la hauteur ne serait pas disponible, le modèle fixe une hauteur moyenne pour tous les niveaux de nuages (bas, moyen, haut). J'ai donc créé trois sous-routines (FLUNA, FLUNB,FLUNC) et seulement l'une d'elles sera exécutée suivant quel cas se présente .

1) Températures des nuages disponibles (FLUNA)
2) Températures des nuages non-disponibles, hauteurs disponibles (FLUNB)

3) Températures et hauteurs non-disponibles (FLUNC)

iii) *Introduction d'un couvert végétal dans le modèle*

Il est important de considérer le couvert végétal pour l'évaluation du bilan d'énergie à la surface car celui-ci affecte directement les flux de chaleur sensible et latente. En négligeant la végétation on néglige, entre autre, la transpiration des feuilles ou des brins d'herbe dans le calcul du flux de chaleur latente. Précédemment le modèle faisait l'hypothèse d'un sol dénudé. La paramétrisation du couvert végétal introduite est celle proposée par Deardoff (1978). Celle-ci a été retenue car c'est elle qui repose le plus sur des principes physiques et qui décrit le mieux la microclimatologie d'un couvert végétal en relation avec les paramètres météorologiques classiques. De plus elle tient compte de la température et de l'humidité spécifique du sol et du feuillage. Elle repose sur des équations empiriques et des équations déduites logiquement de principes physiques. D'autre part elle s'insérait aisément dans le modèle de couche de surface et permettait de conserver la finesse de celui-ci. En annexe 2, on retrouve une description détaillée de cette paramétrisation. Sa caractéristique la plus intéressante est sans doute le calcul de la température des feuilles (ou brins d'herbe) à partir du principe de balance d'énergie dans le couvert végétal, considérant la capacité thermique du couvert négligeable. On calculera les flux de chaleur au-dessus du couvert végétal comme étant la somme des flux de chaleur provenant du sol plus ceux provenant des feuilles (figure 2). À l'annexe 3, on retrouve un organigramme de la nouvelle version de SURFACE.FOR et les nouveaux paramètres d'entrée du modèle.

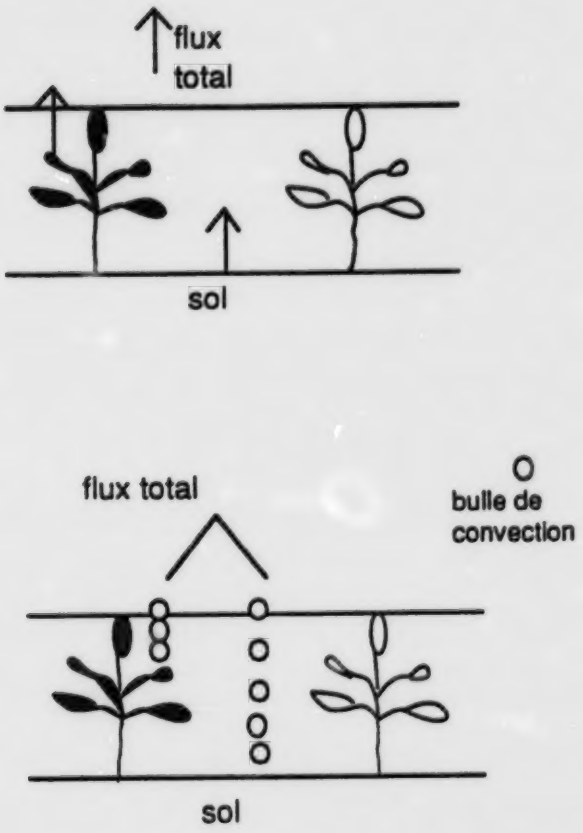



**Fig. 2:** Schéma représentant les flux de chaleur dans le couvert et à l'extérieur. Le flux de chaleur au-dessus du couvert est la somme des flux provenant du sol et des feuilles. Les flux de chaleur sont représentés par des flèches sur la figure du haut et par des bulles de convection sur la figure du bas.

## PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Dans la présentation des résultats qui suit on respectera la convention de signes suivants:

*Flux de chaleur sensible et latente*: positifs du sol vers l'atmosphère

*Flux radiatif solaire et atmosphérique*: positifs vers le bas (vers la surface)

*Flux radiatif terrestre (du sol)*: positifs du sol vers le haut

*Transfert énergie dans le sol*: positifs lorsque dirigé de la surface vers des niveaux plus bas dans le sol. Gain pour le sol dans ce cas.

*Nombre de Richardson*: positif → couche de surface stable

négatif → couche de surface instable

nul → couche neutre

### a) Quelques notions nécessaires à l'interprétation des résultats

- Le gradient de température témoigne de la stabilité de la couche de surface:

$T_a - T_g > 0 \rightarrow$ stabilité → flux négatif de chaleur sensible

$T_a - T_g < 0 \rightarrow$ instabilité → flux positif de chaleur sensible

- Le nombre de Richardson est défini comme le (négatif du) rapport entre la production thermique et la production mécanique d'énergie cinétique turbulente et donne une mesure de l'influence de la stratification thermique sur la turbulence. C'est donc un paramètre de stabilité.

- En régime instable, à la limite où RIB → - ∞ (e.g. production mécanique →0), on a le

régime très instable de convection libre où la turbulence est entièrement d'origine thermique. En régime stable, où RIB est positif, la production mécanique doit dominer pour que la turbulence se maintienne (i.e. RIB < 1). A cause de la dissipation qui tend à détruire la turbulence on observe que celle-ci ne peut se maintenir pour RIB > 0.2 au-delà duquel on observe une turbulence intermittente ou un régime plutôt laminaire. Pour tenir compte des effets de petite échelle, où la turbulence n'est pas aussi faible, on a imposé un maximum de 0.147 pour le nombre de Richardson.

- En régime très stable (RIB = 0.147) les coefficients de transfert turbulent sont très faibles et en régime très instable, ceux-ci seront élevés.

- On peut être en présence d'un gradient de température non nul et d'un flux de chaleur sensible négligeable. En effet si le vent est très faible les coefficients de transfert turbulent seront aussi très faibles.

- Le jour l'atmosphère est généralement caractérisée par une couche de surface instable, en particulier l'été, et la nuit par une couche de surface stable. Ceci veut dire que normalement le gradient de température s'inverse la nuit.

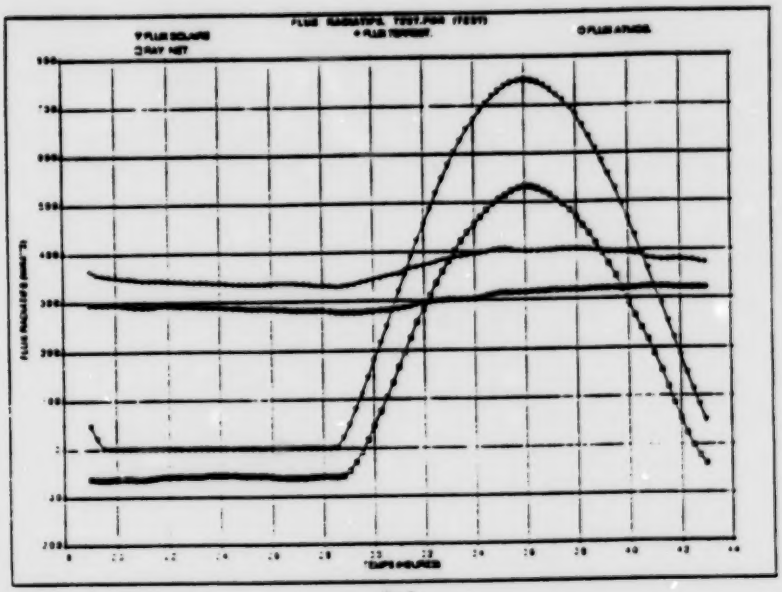
- Un sol sec présentera des valeurs élevées de flux de chaleur sensible et des valeurs faibles de flux de chaleur latente tandis qu'on aura le contraire pour un sol humide. En effet, l'énergie disponible (chaleur du sol) sera d'abord utilisée pour évaporer l'eau du sol.
- Je mentionne ici que toutes les modifications on été testées mais que seuls les résultats les plus pertinents seront présentés.

## b) Résultats

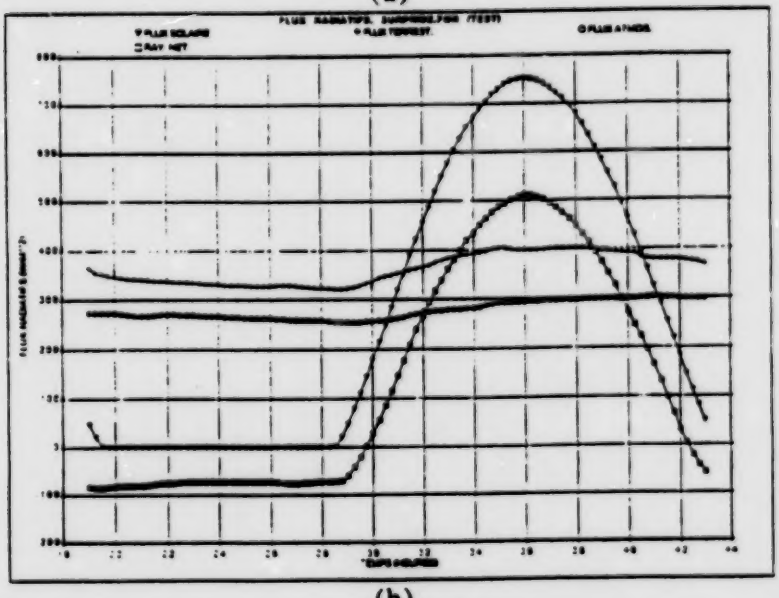
### i) *Paramétrisation du rayonnement long émis par les nuages*

La première partie des résultats concerne les modifications apportées à la paramétrisation du rayonnement long émis par les nuages. Les figures 3.a et 3.b présentent le flux radiatif net et ses composantes pour les versions non modifiées et modifiées. Pour cette simulation on a choisi un couvert nuageux de 0.5 de type stratocummulus (nuage bas) pour toute la période de 24 heures. On remarquera que le flux atmosphérique a diminué d'une valeur constante pour les 24 heures. Il semble donc que dans la version initiale on sur-estimait le rayonnement long émis par le couvert nuageux. Il est difficile d'affirmer que la nouvelle méthode soit réellement meilleure que l'ancienne. En effet le choix d'un profil vertical standard de température pour calculer la température des nuages n'est pas tout à fait réaliste. Cependant on peut tout de même croire que l'ancienne version sur-estimait réellement le rayonnement long atmosphérique lorsqu'on considère que les nuages situés à des niveaux supérieurs (moyen et haut) possèdent des températures moins élevées. A ces niveaux l'écart deviendrait plus grand et on sait que l'ancienne version ne tient pas compte des différences de température des différents nuages.

**Fig. 3:** Rayonnement net et ses composantes calculé à partir (a) de la version non modifiée du programme (nommée temporairement test.for) (b) de la version où la paramétrisation du couvert nuageux a été modifiée (nommée temporairement surprise.for)



(a)



(b)

ii) *Cas du 3 juin 1988*

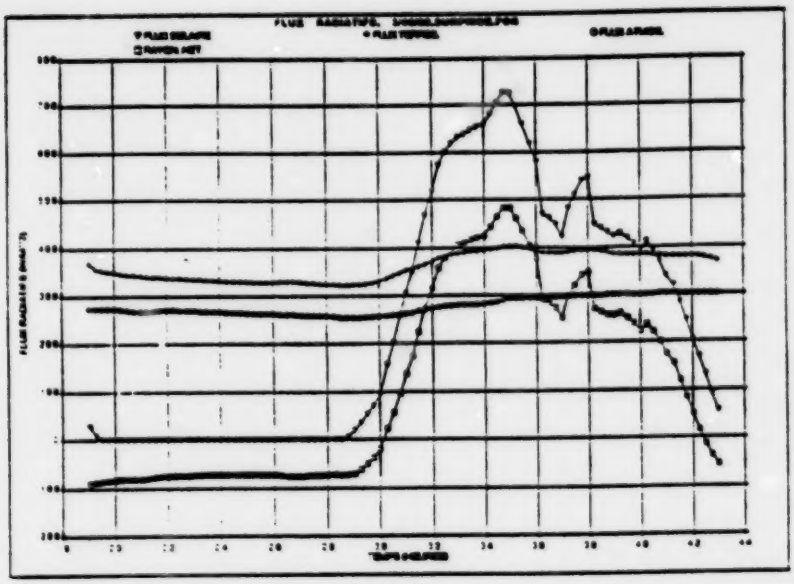
Les figures qui suivent (4 à 6) concernent les résultats obtenus en simulant la journée du 3 juin 1988 pour laquelle on avait les observations des données horaires nécessaires pour le fichier d'entrée. Les données caractérisant la surface et la température profonde pour cette saison sont issues d'un document technique du Centre Canadien Météorologique. Pour cette simulation une valeur constante pour le contenu en eau dans le sol a été utilisée. La simulation débute à 19 heures, heure locale et prend fin 24 heures plus tard.

La figure 4.a présente le flux radiatif net et ses composantes. Le soleil se lève à 28h30 de la simulation (4h30 heure locale en réalité). Le rayonnement net est négatif la nuit et positif le jour, donc le jour on a de l'énergie de disponible pour réchauffer le sol et pour produire de la turbulence. Le rayonnement atmosphérique augmente le jour puisque la température de l'air augmente durant ce temps (figure 4.b). Sur la figure 4.b on observe que la température prédite du sol est en phase avec le rayonnement net diurne, ce qui est consistant avec la réalité. La figure 5 représente l'humidité spécifique de l'air et du sol. L'humidité spécifique du sol augmente durant le jour en phase avec la température du sol puisqu'elle est calculée principalement en fonction de l'humidité spécifique à saturation qui elle dépend de la température du sol. En effet l'humidité spécifique du sol correspond à l'humidité spécifique juste au-dessus du sol et lorsque la température du sol augmente, l'évaporation de l'eau contenue dans le sol augmente aussi.

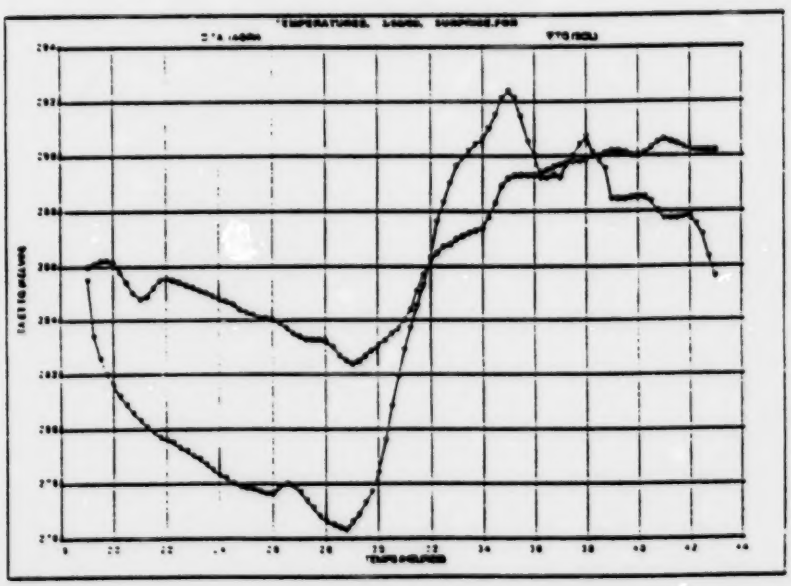
Les flux de chaleur sensible et latente et l'énergie transférée dans le sol sont représentés à la figure 6.a. La nuit tous ces flux sont négatifs et le jour positifs. Plus précisément de 19

heures à environ 26 heures les flux de chaleur latente et sensible sont quasi nuls même s'il existe un gradient d'humidité et de température. Ceci s'explique en considérant que le nombre de Richardson augmente positivement (stabilité croissante) lorsque les gradients augmentent négativement (gradient négatif=valeur plus élevée en altitude qu'au sol) et nous savons que les coefficients de transfert turbulent sont inversement proportionnels au nombre de Richardson dans le cas de la stabilité. De plus, durant cette période le vent n'est pas très fort (figure 7). A la figure 6.b on observe effectivement que le nombre de Richardson atteint sa limite supérieure et donc que les coefficients de transfert sont presque nuls. De 26 heures à environ 27 heures le flux de chaleur sensible devient plus négatif, c'est-à-dire que le flux vers le sol augmente et l'énergie net au sol (énergie transférée au sol) est moins négative, donc le sol perd moins de chaleur. En même temps le flux de chaleur latente devient positif. Durant cette période on remarque aux figures 4.b et 5 que la température du sol augmente légèrement et le gradient d'humidité s'inverse ce qui tend à diminuer la valeur du nombre de Richardson et de plus la vitesse du vent augmente au même moment (figure 7). Comme on l'a déjà expliqué ceci augmente les coefficients de transfert turbulent et donc les flux de chaleur. Il est à remarquer que les flux de chaleur ne deviennent pas instantanément positifs après le levé du soleil puisque les gradients de température et d'humidité ne s'inversent pas immédiatement. Le sol doit être suffisamment réchauffé pour cela. Durant la période d'ensoleillement les fluctuations des flux de chaleur sont en phase avec la grandeur de la vitesse du vent horizontal. La forme plus générale suit la forme du rayonnement net avec un déphasage.

**Fig. 4:** Selon la version modifiée et pour la journée du 3 juin 1988 on a:(a) le rayonnement net et ses composantes (b) les températures à l'abri et du sol.



(a)



(b)

**Fig. 5:** Version modifiée, 3 juin 1988. Évolution dans le temps de l'humidité spécifique à l'abri (QA) et au sol (QG).

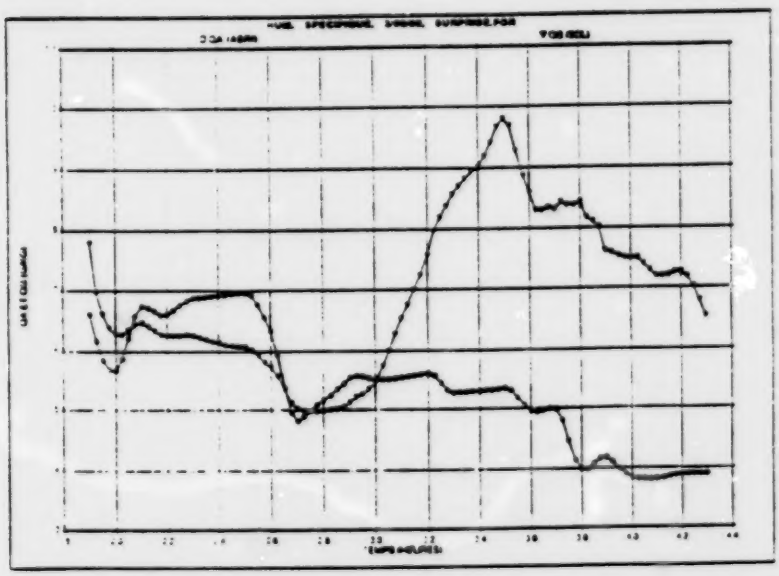
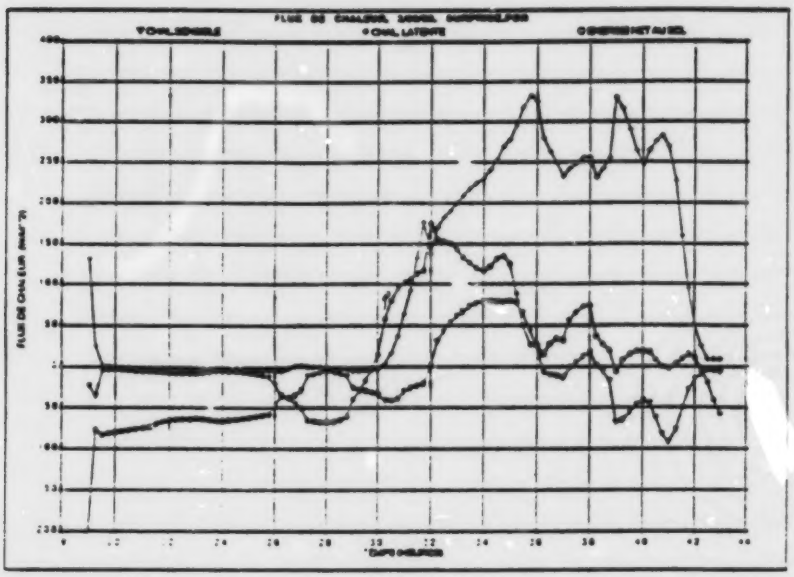
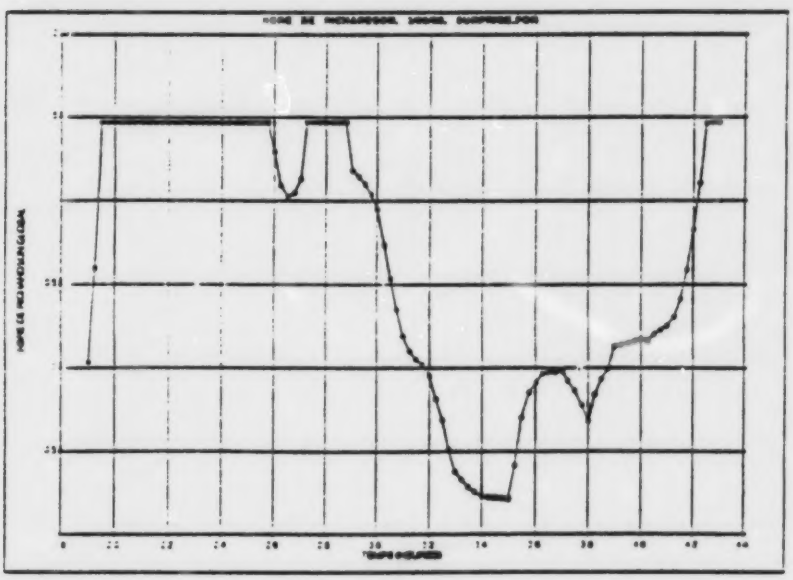


**Fig. 6:** Version modifiée, 3 juin 1988. Évolution dans le temps: (a) des flux de chaleur sensible et latente et du transfert d'énergie dans le sol (énergie net au sol) (b) du nombre de Richardson.

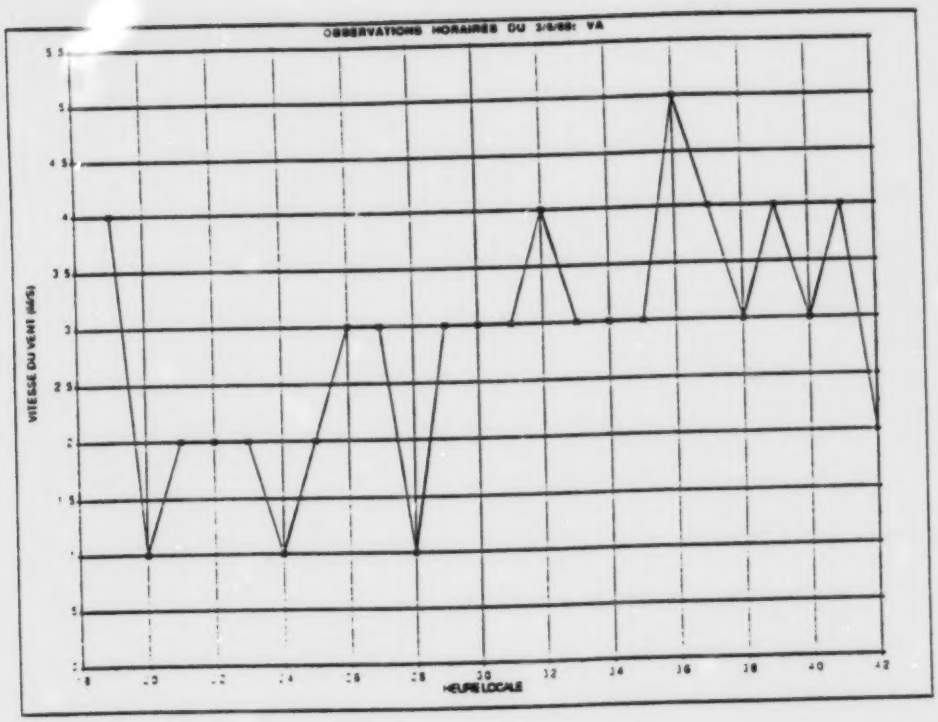


(a)



(b)

**Fig. 7:** Vitesse du vent telle que mesurée horairement au niveau de l'anémomètre pour une période de 24 heures à partir de 19 heures (heure locale) le 3 juin 1988.



iii) *Paramétrisation du couvert végétal*

Les figures 8 à 11 se rapportent à la paramétrisation du couvert végétal. La simulation utilise des observations horaires datant de 1955. A la figure 8 est représenté le flux de chaleur sensible calculé par le programme SURFACE.FOR et par le programme de l'auteur de la paramétrisation (Deardoff, 1978). On remarquera que les deux courbes s'écartent peu jusqu'à 28 heures, heure du levé du soleil. A partir de 28 heures les deux courbes s'écartent un peu plus. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que Deardoff (1978) utilise la méthode du "force restore" pour prédire la valeur de la température du sol. Cette méthode utilise que les valeurs profondes et de surface de température alors que notre méthode utilise les valeurs de température pour dix niveaux dans le sol et l'équation de diffusion de la chaleur dans le sol. D'après Deardoff (1978) le flux de chaleur sensible passerait au positif 30 minutes après le levé du soleil et dans mon cas seulement 1 heure après le levé. Il semblerait qu'il soit tout à fait réaliste que le flux de chaleur sensible ne passe pas au positif si tôt puisqu'il faut un certain temps au sol et aux feuilles pour se réchauffer et renverser le gradient de température de la couche de surface.

A la figure 9 sont représentées les températures de l'air à l'abri, de l'air dans le couvert végétal,de la feuille et du sol. On remarquera que la température du sol, après le levé du soleil, reste inférieure à la température de l'air dans le couvert végétal, sauf vers la fin de journée. Généralement en l'absence de couvert végétal la température du sol devient rapidement plus élevée que celle de l'air au-dessus après le levé du soleil. Dans le cas du couvert végétal il est normal d'avoir la situation ci-haut décrite puisqu'une partie du rayonnement solaire ne se rend pas au sol pour le réchauffer. Par contre la température de feuilles augmente rapidement suite au levé du soleil. De plus les feuilles sont plus faciles à

réchauffer que le sol car on suppose qu'elles n'ont pas d'épaisseur, donc elles ne transfèrent pas d'énergie vers des couches inférieures comme dans le cas du sol.

Aux figures 10.a et 10.b on compare l'évolution de la température du sol calculée par le modèle SURFACE.FOR à celle mesurée lors de la campagne de mesures de 1955, reportées par Penman et Long (1960) et les valeurs calculées et mesurées de la différence entre la température du sol et de l'air dans le couvert. L'ajustement des deux courbes sur chaque figure semble satisfaisant compte tenu qu'il est impossible de mesurer efficacement la température du sol.

Les figure 11 se rapporte à la simulation d'une pluie de 5 mm/hre de 18 heures à 22 heures. Durant le même intervalle de temps le ciel présente un couvert total de stratocummulus. À la figure 11.a on a les flux de chaleur sensible et latente pour le cas où il n'y a pas de précipitation. Ceci servira pour comparer les résultats. A la figure 11.b les mêmes paramètres sont représentés pour le cas de la simulation d'une pluie. Le modèle répond bien à la pluie puisque le flux de chaleur latente est augmenté entre 18 et 22 heures par rapport au cas sans pluie. Aussi, le flux de chaleur sensible vers le sol est diminué d'une part parce que la chaleur disponible dans le sol est utilisée pour évaporer l'eau contenue dans le sol et d'autre part parce que les températures des feuilles, de l'air dans le couvert et du sol vont décroître moins rapidement dans ce cas, dû au fait qu'une partie de la diminution du rayonnement solaire est compensée par une augmentation du rayonnement atmosphérique causée par la présence des nuages.

**Fig. 8:** Évolution temporelle du flux de chaleur sensible selon le modèle SURFACE.FOR (couvert végétal inclus) (••••) comparée au flux de chaleur sensible selon le modèle de Deardoff (••••).

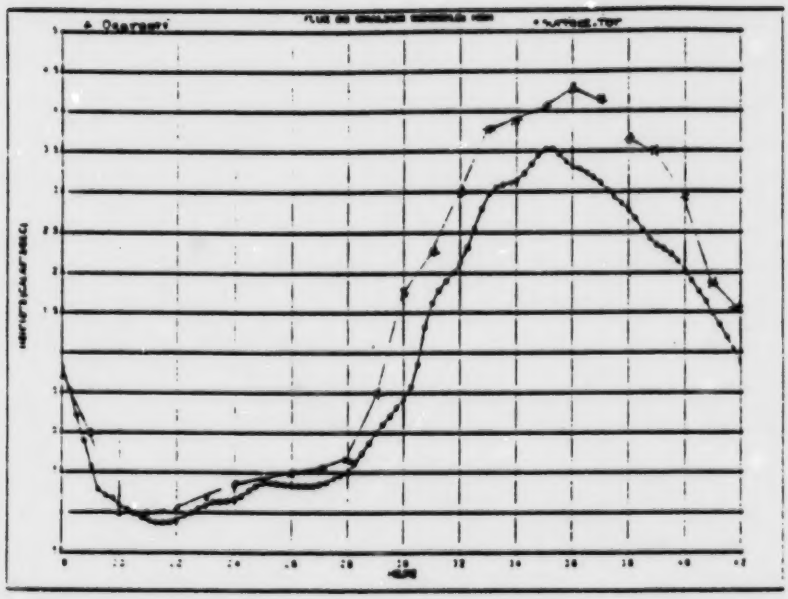


Fig. 9: Selon la dernière version du modèle, incluant la paramétrisation d'un couvert végétal, est représentée l'évolution temporelle des températures de l'air à l'abri (TA) et dans le couvert végétal (TAF), du feuillage (TF) et du sol (TG).

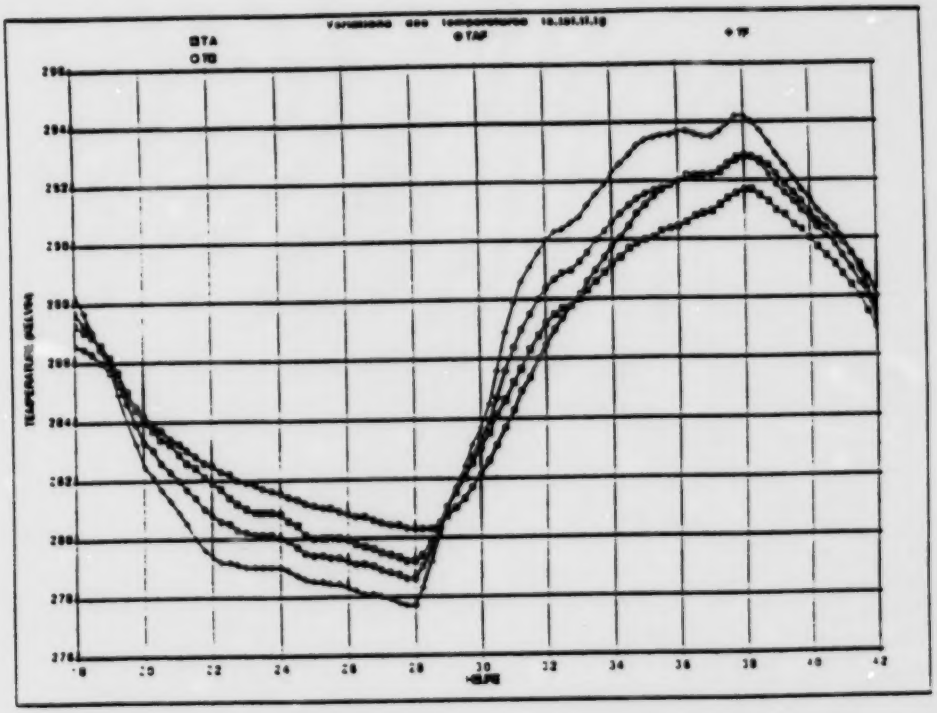
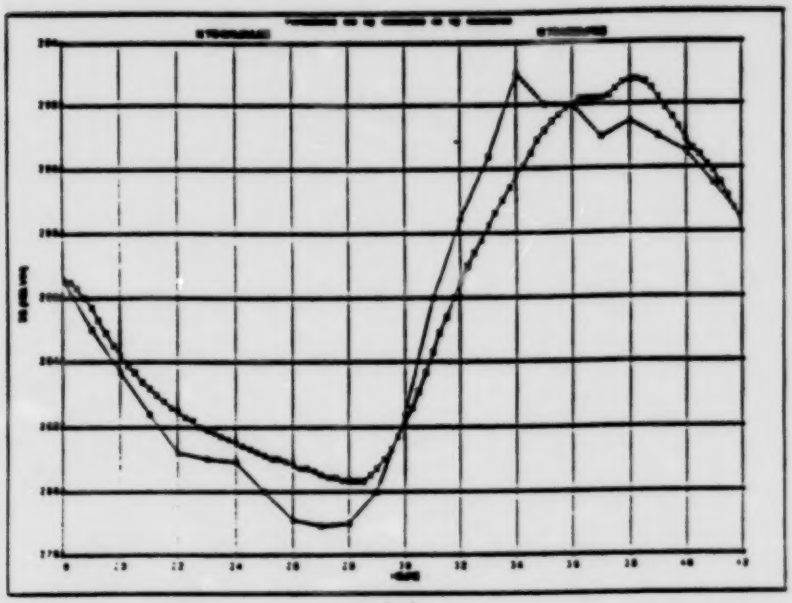
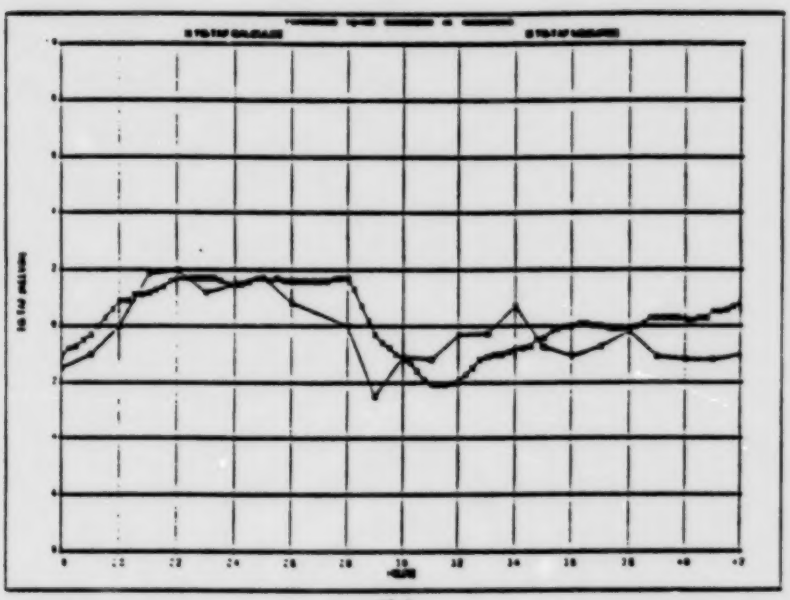


**Fig. 10:** Selon la dernière version du modèle, comprenant la paramétrisation d'un couvert végétal, sont représentées: (a) la température du sol (TG) calculée et mesurée et (b) la différence entre la température du sol et la température de l'air dans le couvert (TAF) calculée et mesurée.

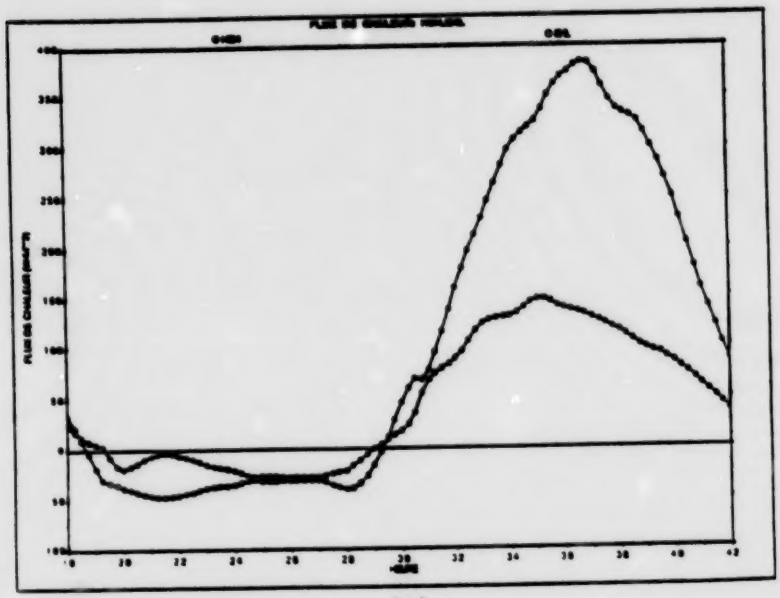


(a)

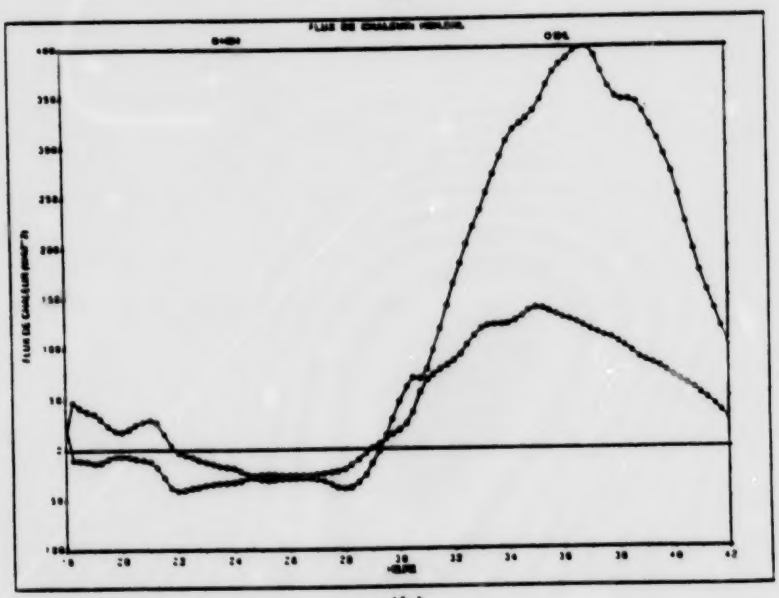


(b)

**Fig. 11:** Selon la dernière version du modèle, comprenant la paramétrisation d'un couvert végétal, sont représentés les flux de chaleur sensible (HSH) et latente (EHL): (a) dans le cas où il n'y a pas de précipitation et (b)dans le cas de la simulation d'une pluie de 5 mm/hre de 18 hres à 22hres.



(a)



(b)

## RECOMMANDATIONS

- La température du sol initiale pourrait être fournie par un relevé satellitaire lorsque le temps le permet.

- Développer une méthode permettant une initialisation du contenu en eau dans le sol consistante avec les conditions antérieures et présentes au moment de l'initialisation. On n'a pas encore défini de méthodes efficaces pour fournir le contenu en eau initial dans le sol. Actuellement le modèle EFR initialise le contenu en eau dans le sol en multipliant la capacité du champs (le contenu maximal d'eau pouvant être contenu dans le sol sans qu'il y ait ruissellement) par l'humidité relative au sol.

- Le programme devra être pourvu d'un module permettant la modélisation en présence de neige.

- Développer un modèle de couche limite afin de pouvoir estimer la hauteur et la turbulence de la couche limite en fonction des flux de chaleur présents dans la couche de surface. Pour ce, on pourrait s'inspirer d'un modèle existant qu'on ajusterait localement. Sans doute faudra-t-il incorporer dans le développement de ce modèle des règles provenant de l'expertise d'un prévisionniste.

- Le module modélisant la couche de surface restera codé en Fortran 77 et un interface sera développé pour permettre au système expert STRATUS d'incorporer les résultats des calculs du module Fortran à sa base de faits au moment opportun lors du déclenchement des règles. Le modèle pourrait rouler indépendamment du système expert à partir des données

horaires des 24 heures précédent le début de la prévision de STRATUS. Ceci permettrait au modèle d'ajuster la température et le contenu en eau du sol pour le début de la prévision de nuages bas. Ensuite, pour l'heure 0 de la prévision, pour laquelle on possédera généralement les observations horaires, le module de couche de surface calculera et fournira au système expert les différents flux calculés et une estimation de la turbulence de la couche de surface. D'après ces informations le système expert effectuera une prévision des nuages bas pour l'heure suivante (l'heure 1). A partir de ce moment, jusqu'à la fin de la prévision c'est le système expert qui fournira le couvert nuageux nécessaire au fonctionnement du module Fortran de couche de surface. Donc, à chaque heure le système expert utilisera les calculs de flux et de turbulence du module Fortran afin de faire une prévision pour l'heure suivante.

- Modifier le modèle afin qu'il puisse tenir compte de l'hétérogénéité du territoire concerné. En effet STRATUS doit fournir une prévision pour l'aéroport de Dorval, cependant les flux de chaleur calculés et utilisés doivent être représentatifs des conditions régnant dans un rayon de 5 miles nautiques autour de l'aéroport. Il s'agira donc de calculer les flux pour chaque type de sol de la région (eau, sol recouvert de végétation, milieu urbain) et de procéder à une moyenne pondérée par rapport à l'importance en superficie de chaque type de sol et aussi par rapport à la direction du vent. Ceci revient à dire qu'on tiendrait compte de l'advection. En effet ce qui se passera à Dorval sera influencé beaucoup plus par ce qui se passe en amont qu'en aval du vent.

## CONCLUSION

Durant ce stage j'ai inclus trois modifications au programme SURFACE.FOR de façon à améliorer la modélisation des processus micrométéorologiques caractérisant la couche limite et chacune d'elles a été testée et donne des résultats réalistes. Le contexte mathématique et physique qui sous-tend chacune des modifications m'apparaît très honnête. Le programme ne peut être opérationnel dès maintenant puisque les coefficients de transfert turbulent ont été fixés constants dans le programme depuis l'introduction de la paramétrisation d'un couvert végétal. Dans la version initiale (sans couvert végétal) on calculait les coefficients d'échange turbulent, à tous les pas de temps, à partir du nombre de Richardson. Cependant avec l'introduction du couvert végétal dans le modèle il devient nécessaire de distinguer entre le nombre de Richardson applicable à un sol nu et celui applicable au-dessus d'un couvert végétal dense en faisant la même distinction pour les coefficients de transfert turbulent. Les expressions associées au calcul de ces nouveaux nombres de Richardson n'ont pas encore été déterminées. Cependant dans le cadre de mon mémoire de maîtrise je poursuis l'étude de la couche limite et les expressions adéquates pour le calcul des nombres de Richardson seront établies et codées. Le programme deviendra donc fonctionnel pour l'étude locale (ex: Dorval) des flux de chaleur et de la turbulence de la couche de surface. Je suggère cependant de construire un test pour valider localement (Dorval) le programme afin d'augmenter la confiance que l'on peut accorder à la paramétrisation du couvert végétal.

Ce module de couche de surface sera intégré à un modèle locale de couche limite et associé à un modèle de circulation générale il deviendra alors possible de mieux connaître et prédire la structure de la couche limite atmosphérique.

## BIBLIOGRAPHIE

DEARDOFF, J.W., "Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture, with Inclusion of a Layer of Vegetation", Journal of Geophysics resources, vol. 83, 1978, pp. 1889-1903.

PENMAN, H.L., LONG, I.F., "Weather in Wheat: An Essay in Micrometeorology", Quarterly Journal of Royal Meteorology Society, vol 86, 1960

TORLASHI, E., "Couche Limite et Micrométéorologie", Notes du cours SCA 7025, UQAM, 1987.

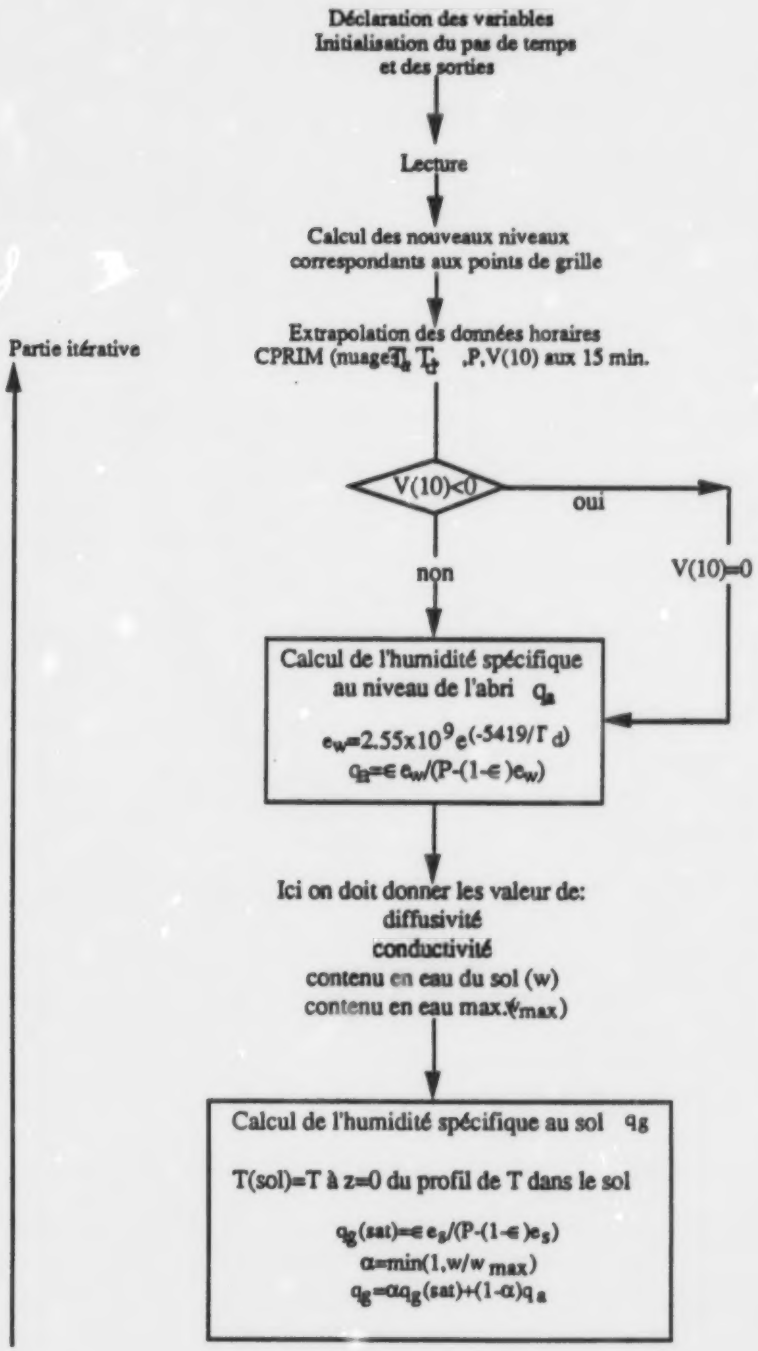
## RÉFÉRENCE

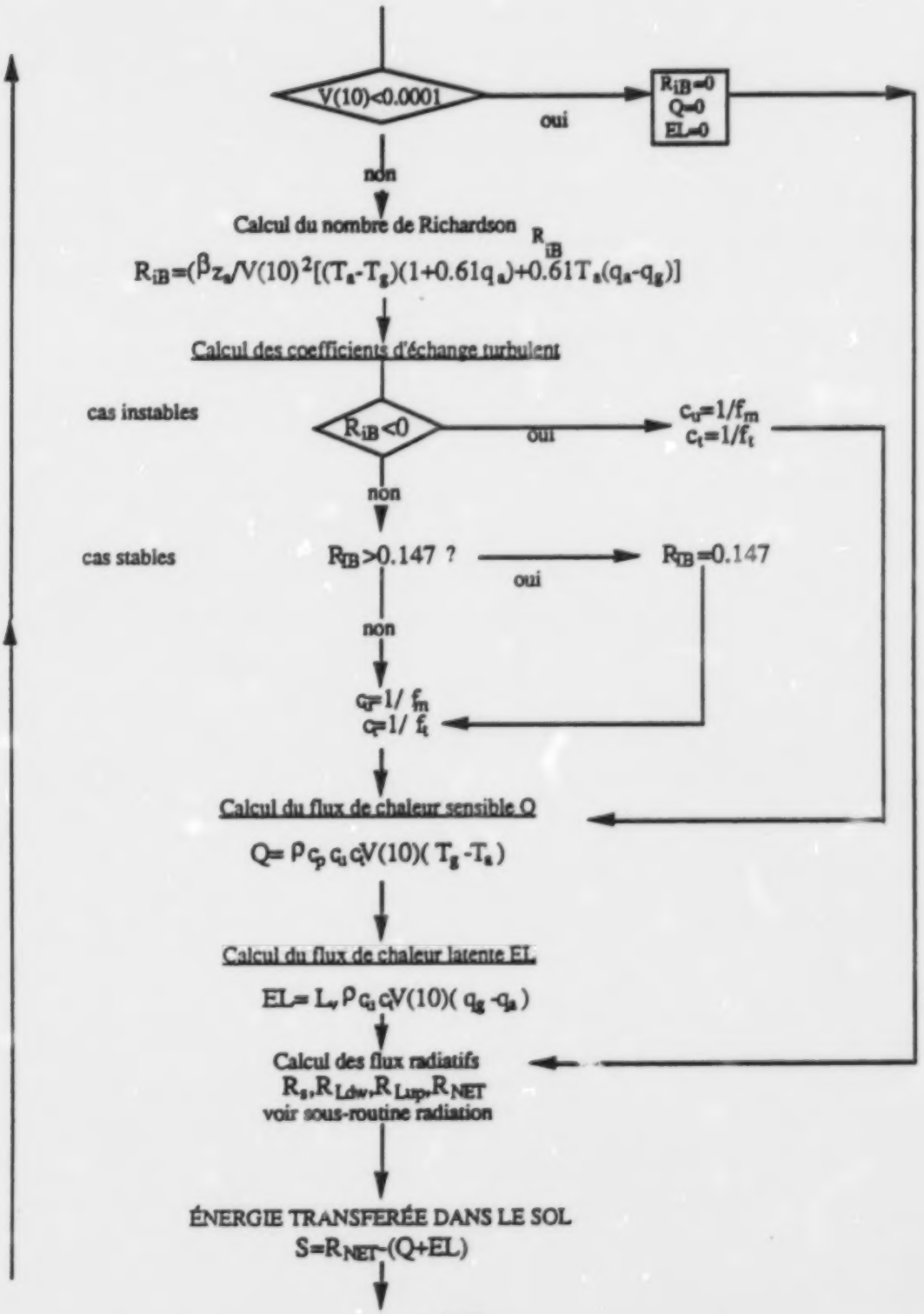
COTNOIR, A., ZWACK, P., "Prévisions de nuages bas par principes physiques", Extrait du document OASIS progress report, Document interne, Montréal, Centre de recherche informatique de Montréal, 1988.

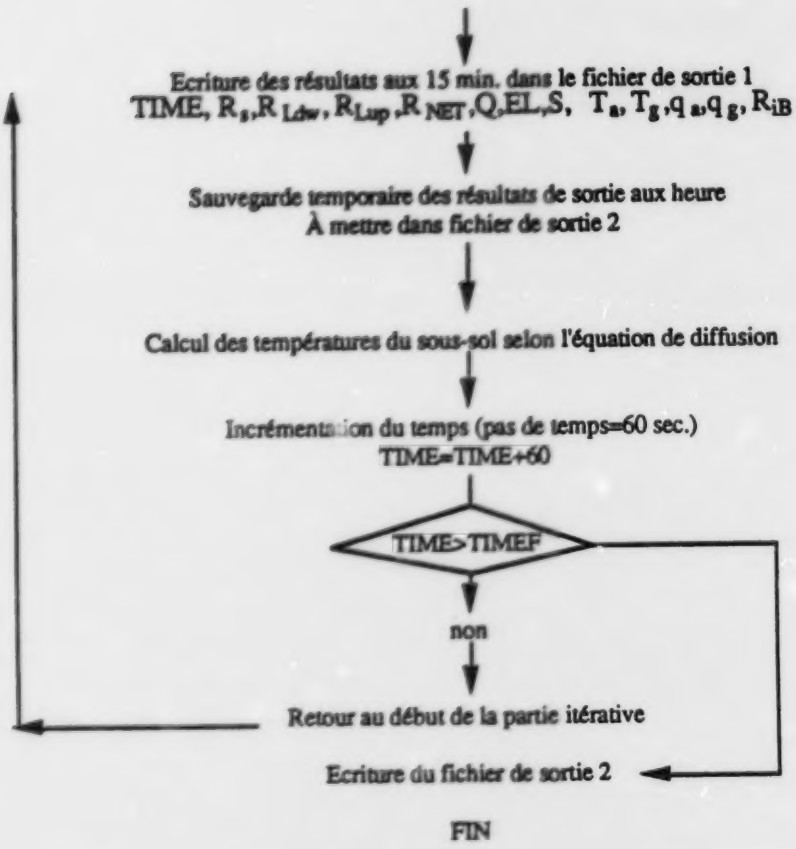
# Annexe 1

# ORGANIGRAMME DE LA VERSION INITIALE DE SURFACE.FOR.

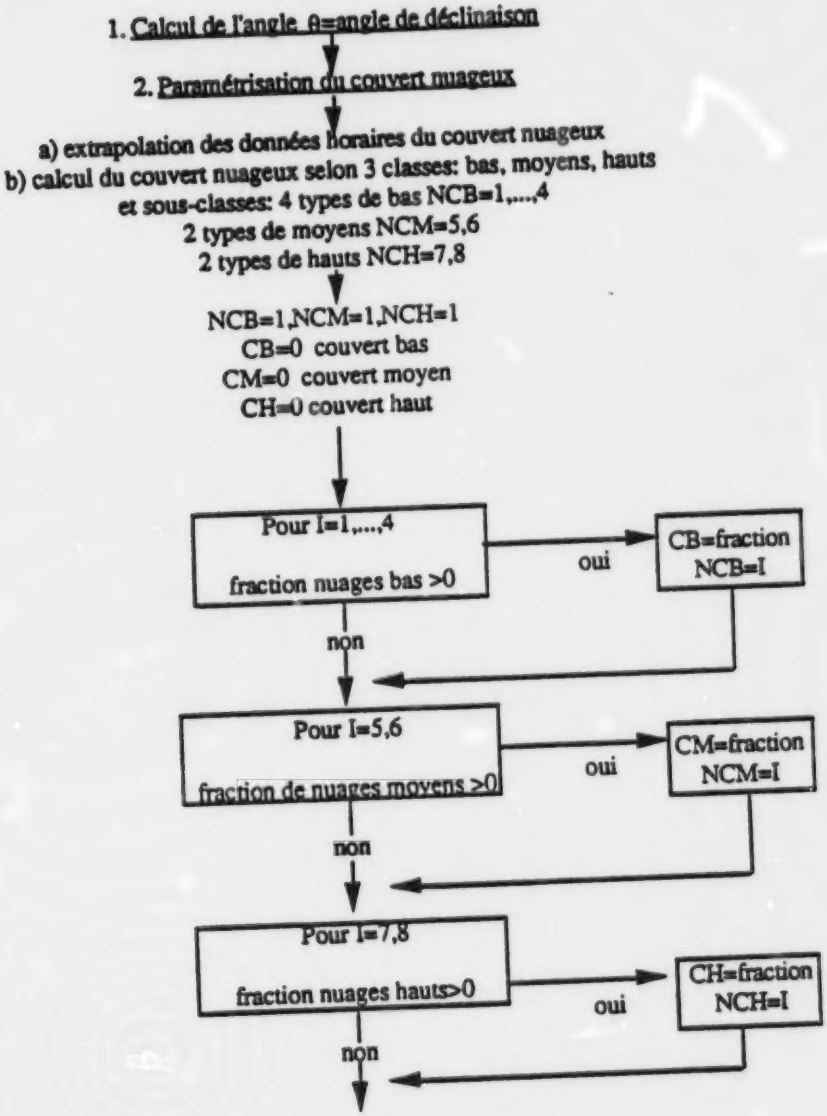
ORGANIGRAMME DU PROGRAMME
SURFACE.FOR

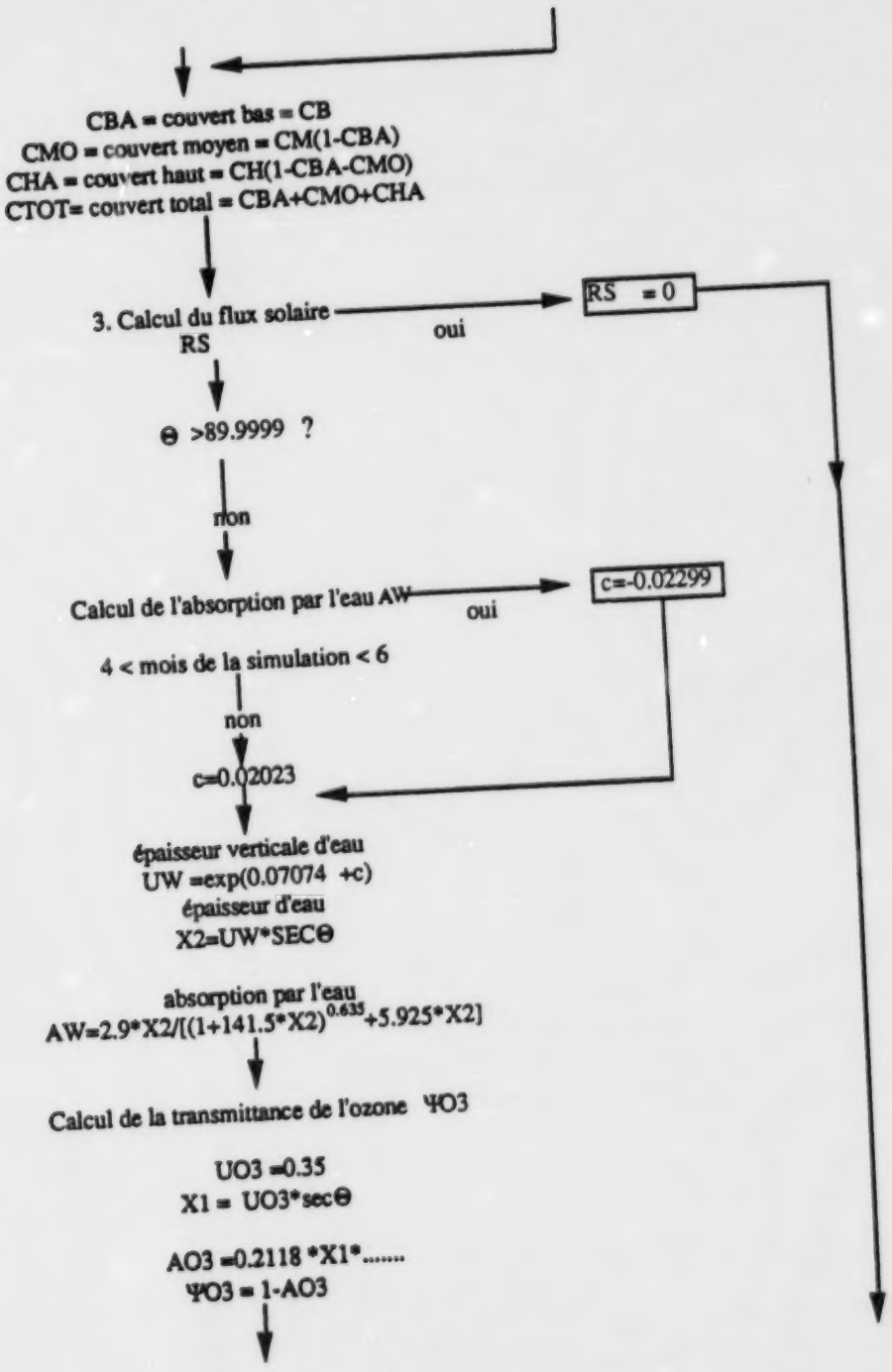



V(10)<0.0001
oui
$R_{iB}$=0
Q=0
EL=0
non
Calcul du nombre de Richardson $R_{iB}$
$R_{iB}=(\beta z_a/V(10)^2[(T_a-T_g)(1+0.61q_a)+0.61T_a(q_a-q_g)]$
Calcul des coefficients d'échange turbulent
cas instables
$R_{iB}$<0
oui
$c_u=1/f_m$
$c_t=1/f_t$
non
cas stables
$R_{iB}$>0.147 ?
oui
$R_{iB}$=0.147
non
$c_u=1/f_m$
$c_t=1/f_t$
Calcul du flux de chaleur sensible Q
$Q=\rho c_p c_u c_t V(10)(T_g-T_a)$
Calcul du flux de chaleur latente EL
$EL=L_v \rho c_u c_t V(10)(q_g-q_a)$
Calcul des flux radiatifs
$R_s, R_{Ldw}, R_{Lup}, R_{NET}$
voir sous-routine radiation
ÉNERGIE TRANSFERÉE DANS LE SOL
$S=R_{NET}-(Q+EL)$


Ecriture des résultats aux 15 min. dans le fichier de sortie 1
TIME, $R_s$, $R_{Ldw}$, $R_{Lup}$, $R_{NET}$, Q, EL, S, $T_a$, $T_g$, $q_a$, $q_g$, $R_{iB}$
Sauvegarde temporaire des résultats de sortie aux heure
À mettre dans fichier de sortie 2
Calcul des températures du sous-sol selon l'équation de diffusion
Incrémentation du temps (pas de temps=60 sec.)
TIME=TIME+60
TIME>TIMEF
non
Retour au début de la partie itérative
Ecriture du fichier de sortie 2
FIN

## SOUS-ROUTINE RADIATION




CBA = couvert bas = CB
CMO = couvert moyen = CM(1-CBA)
CHA = couvert haut = CH(1-CBA-CMO)
CTOT= couvert total = CBA+CMO+CHA
3. Calcul du flux solaire RS
oui
RS = 0
Θ >89.9999 ?
non
Calcul de l'absorption par l'eau AW
oui
c=-0.02299
4 < mois de la simulation < 6
non
c=0.02023
épaisseur verticale d'eau
UW =exp(0.07074 +c)
épaisseur d'eau
X2=UW*SECΘ
absorption par l'eau
AW=2.9*X2/[(1+141.5*X2)^0.635+5.925*X2]
Calcul de la transmittance de l'ozone ΨO3
UO3 =0.35
X1 = UO3*secΘ
AO3 =0.2118 *X1*.....
ΨO3 = 1-AO3

Calcul de la transmittance des aérosol $\Psi AA, \Psi AS$
due à l'absorption et à la diffusion

$$\Psi AA = 0.95^{SEC\theta/2}$$

$$\Psi AS = \Psi AA$$

Calcul de la diffusion de Rayleigh
$\Psi R$ =valeur dépend de $\Theta$ et définie dans un tableau data

Calcul du rayon vecteur RV

Calcul du rayonnement solaire sans nuage RSO

B=0.65 (ratio forward to total scatter)

$$I(Z_{top}) = 1353 * \cos\theta / (RV)^2$$

$$RSO = I(Z_{top}) * (\psi O3 - \alpha W) * \psi AA * (1 - \psi R * \psi AS) B$$

Calcul de la transmittance du couvert nuageux $\Psi i = B, M, H$

CB=0

non

$$TB = a(NCB) e^{-b(NCB) SEC\theta}$$

$$\psi B = 1 - (1 - TB) CB$$

CM=0

non

$$TM = a(NCM) e^{-b(NCM) SEC\theta}$$

$$\Psi M = 1 - (1 - TM) CM$$

TH= ....
ΨH= ....

Calcul de l'albedo en fonction de l'angle Θ
$\alpha G=\alpha+(1-\alpha)e^{(-0.1(90-\theta)}$

Calcul du rayonnement solaire avec nuages RS

$RS=RSO(1+0.6*\alpha G*CTOT)*\psi B*\psi M*\psi H$
0.6= albedo des nuages

4.Calcul du rayonnement long atmosphérique: RLdw

a) du ciel clair RLO

$RLO=\sigma TA^4(1-0.261e^{(-7.77X10^{-4}(273-TA)^2)})-20$

b) des nuages

RLN =60*CTOT
RLdw =RLO + RLN

5.Calcul du long terrestre: RLup

$RLup = \varepsilon\sigma T^4$

6.Calcul du rayonnement net: RNET

$RNET=(1-\alpha G)RS+RLdw-(1-\varepsilon)RLdw-RLup$

FIN

# Annexe 2

# PARAMÉTRISATION DU COUVERT VÉGÉTAL SELON DEARDOFF (1978)

Paramétrisation du couvert végétal selon Deardoff (1978)

Caractéristiques

- Présence d'une seule couche de végétation
- Capacité thermique de la couche négligeable
- Densité du couvert végétal est caractérisée par $\sigma_f$, qui est un facteur de la surface moyenne du sol ombragée et représente la fraction de rayonnement solaire que le couvert végétal intercepte et qui ne se rend pas au sol.

  sol dénudé $\rightarrow \sigma_f = 0$

  couvert dense $\rightarrow \sigma_f = 1$ ($\sigma_f$ peut varier au cours de l'année)

- Il devient nécessaire de distinguer les différents coefficients de transfert turbulent suivants:

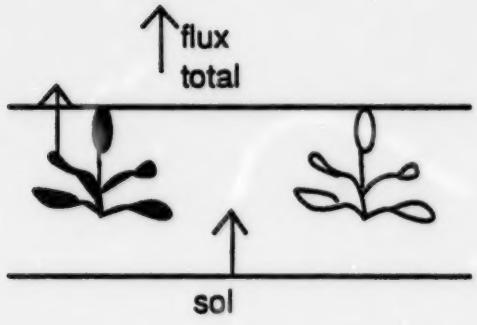
  $c_{Hg}$ : applicable au sol sous-tendu par le couvert végétal

  $c_{Ho}$ : applicable à une surface nu, $\sigma_f = 0$

  $c_{Hh}$ : applicable pour un couvert dense, $\sigma_f = 1$

  $c_{Hg} = (1-\sigma_f)\, c_{Ho} + \sigma_f\, c_{Hh}$

Les flux de chaleur vus au niveau z=h seront la somme des flux de chaleur du feuillage et des flux de chaleur du sol.



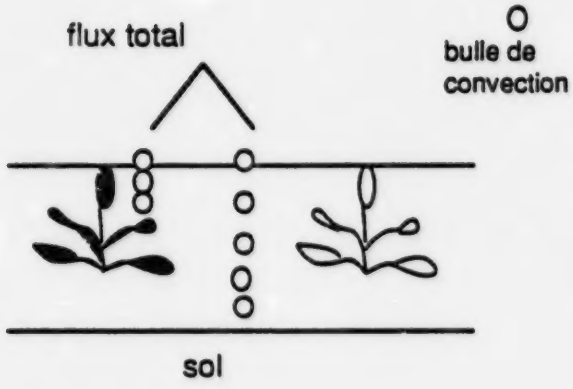




**Fig. 12:** Représentation schématique du couvert végétal au-dessus du sol.

Paramétrisation

A l'intérieur du couvert le vent est dénoté par $V_{af}$ et est prescrit par:

$$V_{af} = 0.83\ \sigma_f\ c_{Hh}^{1/2}\ V_a + (1-\sigma_f)\ V_a$$

$V_a$ : vitesse du vent à l'anémomètre

On remarquera que dans les cas où il n'y a pas de végétation que $V_{af}$ prend la valeur de $V_a$ et en présence d'un couvert dense, $\sigma_f = 1$, $V_{af} = 0.83\ c_{Hh}^{1/2}\ V_a$. Deardoff mentionne que le facteur de 0.83 provient des études menées par Legg et Long (1975), Thom (1972), Webb (1975) et Geiger (1965).

On assume que l'air dans le couvert végétal prend des propriétés intermédiaires entre les propriétés de l'air au-dessus du couvert à $z = z_a$ (niveau de l'abri), les propriétés de surface des feuilles et les propriétés du sol.

Ainsi pour la température de l'air et l'humidité spécifique dans le couvert on a:

$$T_{af} = (1-\sigma_f)\ T_a + \sigma_f\ (0.3\ T_a + 0.6\ T_f + 0.1\ T_g)$$

$$q_{af} = (1-\sigma_f)\ q_a + \sigma_f\ (0.3\ q_a + 0.6\ q_f + 0.1\ q_g)$$

$T_a$, $q_a$ : température et humidité spécifique de l'air à l'abri

$T_f$, $q_f$ : température et humidité spécifique de la feuille

$T_g$, $q_g$ : température et humidité spécifique du sol à la surface

L'influence du feuillage sur $T_{af}$ et $q_{af}$ est plus importante que celle du sol puisque dans les situations d'un couvert relativement dense, la surface totale des feuilles (recto-verso) devient plus importante que la surface du sol au-dessous.

Le flux de chaleur sensible pour une feuille est donné par:

$$H_f = \rho_a c_p c_f V_{af} (T_f - T_{af})$$

et

$$c_f = 0.01 (1 + 0.3_{(m/s)}/V_{af})$$

$\rho_a$ : densité de l'air

$c_p$ : chaleur thermique à pression constante pour l'air sec

où $c_f$ est un coefficient adimensionnel de transfert de chaleur qui tient compte des deux côtés de la feuille. L'indice de la surface nette de feuille dans le couvert (N) est défini comme la surface totale de feuilles, en considérant qu'un seul côté de celles-ci, sur la surface totale du sol sous-tendu. Alors le flux de chaleur sensible du feuillage à son environnement est donné par l'approximation suivante:

$$H_{sf} = 1.1 N H_f$$

Le facteur 1.1 représente l'effet des tiges qui échangent de la chaleur mais qui ne transpirent pas. $N=7\sigma_f$ est une bonne approximation.

Une généralisation des équations de Monteith et Szeicz (1962) mène Deardoff à poser l'équation suivante pour le flux de chaleur latente (représentatif du taux d'évaporation) pour une seule feuille.

$$LE_f = L\rho_a c_f V_f (q_{sat}(T_f) - q_{af}) r'$$

où

$$r' = 1 - \delta_c [ r_s/(r_s + r_a)] [1 - (w_{dew}/w_{dmax})^{2/3}] \qquad \delta_c = 1 \text{ si } q_f < q_{sat}(T_f)$$

$$\delta_c = 0 \text{ si } q_f = q_{sat}(T_f)$$

L : coefficient de chaleur latente à vaporisation

$q_{sat}(T_f)$ : humidité spécifique à saturation évaluée à $T_f$

$r_s$ : résistance stomatale des feuilles

$r_a$ : résistance aérodynamique de l'air dans le couvert

r' : fraction du taux d'évaporation potentielle qui est évaporé en réalité.

$W_{dew}$ : contenu d'eau condensée sur les feuilles

$W_{dmax}$ : contenu d'eau maximal condensable sur les feuilles

L'évaporation potentielle est celle qu'on aurait dans des conditions où la feuille contiendrait l'humidité spécifique maximale possible pour une certaine température de la feuille; c'est-à-dire l'humidité spécifique à saturation.

Sous le principe de balance d'énergie dans le couvert végétal, Deardoff établit une équation afin d'estimer la température moyenne des feuilles. Les valeurs au niveau supérieur du couvert sont dénotées par l'indice h, celles du sol par l'indice g et la direction des flux par des flèches. L'hypothèse que l'énergie ne peut s'accumuler dans le couvert est retenue et mène à l'équation suivante.

$$S_h\downarrow + R_{Lh}\downarrow - S_h\uparrow - R_{Lh}\uparrow - (S_g\downarrow + R_{Lg}\downarrow - S_g\uparrow - R_{Lg}\uparrow) = H_{Sh} - H_{Sg} + L(E_h - E_g)$$

où

S représente le rayonnement court, $R_L$ le rayonnement long, $H_S$ le flux de chaleur sensible et E l'évapo-transpiration.

$S_h\downarrow$ et $R_{Lh}\downarrow$ sont connus et calculés dans une sous-routine du programme original. Par définition de $\sigma_f$ et de $\alpha_g$, $S_g\downarrow$ et $S_g\uparrow$ sont donnés par :

$$S_g\downarrow = (1-\sigma_f)\, S_h\downarrow$$

$$S_g\uparrow = \alpha_g\,(1-\sigma_f)\, S_h\downarrow \qquad \alpha_g : \text{albedo de la surface du sol}$$

L'expression du rayonnement long vers le haut au niveau du sol, $R_{Lg}\uparrow$, constitue une interpolation entre l'expression applicable au-dessus d'un sol nu et celle applicable au-dessus d'un sol sous-tendant un couvert très dense ($\sigma_f = 1$).

$$RLg\uparrow = (1-\sigma_f)\,[\,\varepsilon_s\sigma T_g^4 + (1-\varepsilon_g)\,R_{Lh}\downarrow] + \sigma_f[\varepsilon_g\sigma T_g^4 + (1-\varepsilon_g)\,\varepsilon_f\sigma T_f^4]/(\varepsilon_f+\varepsilon_g - \varepsilon_g\varepsilon_f)$$

$\varepsilon_s$ : émissivité du sol

$\varepsilon_f$ : émissivité de la feuille

$\sigma$ : constante de Stephan-Boltzman

Pour $\sigma_f = 1$, cette expression se résume à celle du flux radiatif entre deux plaques parallèles (Fleagle et Businger (1963)) d'émissivité $\varepsilon_g$ et $\varepsilon_f$. Pour $\sigma_f = 1$ et $\varepsilon_g = 0$, l'expression tient compte de la réflection vers le haut de $R_{Lh}\downarrow$.

Les autres flux radiatifs sont obtenus de façon similaire.

$$S_h\uparrow = (1-\sigma_f)\,\alpha_g S_h\downarrow + \sigma_f\alpha_f S_h\downarrow$$

$$R_{Lh}\uparrow = (1-\sigma_f)\,[\varepsilon_g\sigma T_g^4 + (1-\varepsilon_g)R_{Lh}\downarrow] + \sigma_f[\varepsilon_f\sigma T_f^4 + (1-\varepsilon_f)R_{Lh}\downarrow$$

$$R_{Lg}\downarrow = (1-\sigma_f)\,R_{Lh}\downarrow + \sigma_f[\varepsilon_f\sigma T_f^4 + (1-\varepsilon_f)\varepsilon_g\sigma T_g^4]/(\varepsilon_f+\varepsilon_g-\varepsilon_g\varepsilon_f)$$

En substituant ces équations dans l'équation de la balance d'énergie et avec les définitions suivantes:

$$E_f \equiv E_h - E_g$$

$$H_{Sf} \equiv H_{Sh} - H_{Sg}$$

$E_h$ : taux d'évaporation vu au-dessus du couvert (i.e. au niveau z=h)

$E_g$ : taux d'évaporation au-dessus du sol

$H_{Sh}$ : flux de chaleur sensible vu au-dessus du couvert

HSg : flux de chaleur sensible au-dessus du sol

on obtient:

$$\sigma_f\{(1-\alpha_f)S_h\downarrow + \varepsilon_f R_{Lh}\downarrow + [\varepsilon_g\varepsilon_f/(\varepsilon_f+\varepsilon_g-\varepsilon_g\varepsilon_f)]\sigma T_g^4 - [(\varepsilon_f+2\varepsilon_g - \varepsilon_g\varepsilon_f)/(\varepsilon_f+\varepsilon_g-\varepsilon_g\varepsilon_f)]\varepsilon_f\sigma T_f^4\} = H_{Sf} + L_{Ef}$$

Cette équation peut être solutionnée pour trouver $T_f$ puisque $H_{Sf}$ et $E_f$ peuvent être écrits en fonction de $T_f$. En effet on a:

$$H_{Sf}=1.1(7\sigma_f)\rho_a c_p\, c_f\, V_{af}\,(T_f - T_{af})$$

$$E_f = 7\sigma_f\, \rho_a\, c_f\, V_{af}\,(q_{sat}(Tf) - q_{af})r'$$

$T_{af}$, $q_{af}$ et $q_{sat}(T_f)$ peuvent s'écrire en fonction de $T_f$. En effet on a vu que:

$$T_{af} = (1-\sigma_f)\, T_a + \sigma_f\,(0.3\, T_a + 0.6\, T_f + 0.1\, T_g)$$

$$q_{af} = (1-\sigma_f)\, q_a + \sigma_f\,(0.3\, q_a + 0.6\, q_f + 0.1\, q_g)$$

$$q_f = r' q_{sat}\,(T_f) + (1-r')q_{af}$$

$q_{sat}(T_f)$ sera linéarisé en utilisant le développement en série de Taylor :

$$q_{sat}(T_f^{n+1}) = q_{sat}(T_f^n) + (\partial q_{sat}/\partial T)_{T_f^n}(T_f^{n+1} - T_f^n)$$

n→pas de temps précédent

n+1 → pas de temps actuel

$(\partial q_{sat}/\partial T)$ est obtenu de l'équation de Clausius-Clayperon et donne:

$$(\partial q_{sat}/\partial T) = q_{sat}\, l_v / R_v\, T_f^2$$

$l_v$ : chaleur latente de vaporisation

$R_v$ : constante des gaz pour l'air

Le terme de droite est évalué avec les valeur de $q_{sat}$ et $T_f$ du pas de temps précédent. Dans l'expression de $q_{af}$, $q_f$ sera écrit en fonction de $q_{sat}(T_f)$ et de $q_{af}$. Alors on pourra isoler $q_{af}$ en fonction de $q_a$, $q_g$ et $T_f$ (qui se trouve dans l'expression de $q_{sat}(T_f)$). Le terme contenant $T_f^4$ sera linéarisé de telle sorte qu'on obtiendra une équation dans laquelle on pourra isoler $T_f$ en fonction de paramètres dont les valeurs auront pu être calculées auparavant. On linéarise $T_f^4$ à l'aide du développement en série de Taylor.

$$[T_f^{n+1}]^4 = [T_f^n]^4 + 4[T_f^n]^3 [T_f^{n+1} - T_f^n]$$

Une fois $T_f$ connue pour le pas de temps actuel, on calcul l'humidité spécifique au sol, dans le couvert végétal et au niveau de la feuille ($q_g$, $q_{af}$ et $q_f$) et la température de l'air dans le couvert ($T_{af}$). Il est alors possible de calculer toutes les composantes radiatives du bilan d'énergie et par suite les composantes du bilan net d'énergie au sol encore inconnues; c'est-à-dire les flux de chaleur sensible et latente au sol ($H_{Sg}$, $LE_g$) et l'énergie transférée dans le sol (S).

$$H_{Sg} = \rho_a c_p c_{Hg} V_{af}(T_g - T_{af})$$

$$LE_g = L\rho_a c_{Hg} V_{af}(q_g - q_{af})$$

$$S = -H_{Sg} - LE_g + (1-\alpha_g)S_g\downarrow - R_{Lg}\uparrow + R_{Lg}\downarrow$$

La connaissance des valeurs des flux de chaleur au sol est indispensable pour calculer les flux de chaleur au-dessus du couvert végétal ($H_{Sh}$, $LE_h$). En effet le flux de chaleur sensible au-dessus du couvert est la somme du flux de chaleur sensible au sol et du flux de chaleur sensible au niveau de la feuille ($H_{Sf}$). Le même raisonnement s'applique au flux de chaleur

latente.

$$H_{Sh} = H_{Sg} + H_{Sf}$$
$$LE_h = LE_g + LE_f$$

Il est à noter que dans les expressions des flux de chaleur sensible et latente au sol on a remplacé le coefficient de transfert turbulent pour un sol nu par celui d'un sol couvert par la végétation. De plus les gradients de température et d'humidité spécifique ne sont pas évalués comme dans la version originale. Par exemple pour le gradient de température on avait ($T_g$-$T_a$) et maintenant on a ($T_g$-$T_{af}$).

Comme précédemment l'équation de diffusion de la chaleur dans le sol est utilisée pour calculer la température du sol du pas de temps ultérieur. Il y avait une légère erreur de logique au niveau de la programmation qui a été corrigée. Les équations d'évolution de la quantité d'eau dans le sol ont été légèrement modifiées pour tenir compte des effets de la transpiration ce qui mène aux nouvelles équations suivantes:

$$\partial w_g/\partial t = -C_1(E_g+0.1E_{tr}-P_g)/(\rho_w d_1) - C_2(w_g-w_2)/\tau_1$$
$$\partial w_2/\partial t = -(E_g+E_{tr}-P_g)/(\rho_w d_2)$$

$w_g$ : contenu en eau à la surface

$w_2$ : contenu moyen en eau pour la couche profonde (de 5 cm à 2 mètres)

$C_1$ et $C_2$ : coefficients dépendants du type de sol

$\tau_1$ : période (24 hres)

$\rho_w$ : densité de l'eau

$d_1$ : profondeur du cycle diurne de l'humidité

$d_2$ : profondeur au-dessous de laquelle le flux d'humidité est négligeable

$P_g$ : taux de précipitation se rendant au sol

Les valeurs utilisées dans le programme SURFACE.FOR sont celles présentées par Deardoff (1978) et sont les mêmes que celles utilisées dans le modèle EFR.

Le seul terme ajouté dans chacune de ces équations est celui de $E_{tr}$. Étant donné que la majeure partie de l'eau utilisée à la transpiration provient de la couche de terre sous-jacent la couche superficielle, seulement 0.1 de $E_{tr}$ influencera $w_g$. Cependant $w_2$ sera influencé de façon importante puisque l'eau nécessaire à l'évaporation est directement pompée de la partie profonde du sol de contenu moyen en eau $w_2$.

L'évaluation de la précipitation au sol sera désormais donnée par:

$$P_g = P(1-\sigma_f) \qquad \text{si } W_{dew} < W_{dmax}$$

$$P_g = P \qquad \text{si } W_{dew} \geq W_{dmax}$$

où P est la précipitation reçue au niveau de la feuille.

Une nouvelle équation a été ajoutée afin de calculer et de prédire la valeur du contenu en eau condensée sur le feuillage, soit:

$$\partial W_{dew}/\partial t = \sigma_f P - (E_f - E_{tr}) \qquad 0 \leq W_{dew} \leq W_{dmax}$$

La différence ($E_f$ - $E_{tr}$) représente l'évaporation ou la condensation d'eau liquide des ou sur les feuilles.

Le pas de temps actuel est de 60 secondes et pourrait être appelé à changer.

# Annexe 3

## NOUVEAUX PARAMÈTRES D'ENTRÉE DE SURFACE.FOR

## ORGANIGRAMME DE LA NOUVELLE VERSION DE SURFACE.FOR INCLUANT LA PARAMÉTRISATION DU COUVERT VÉGÉTAL

## - NOUVEAUX PARAMÈTRES D'ENTRÉE DE SURFACE.FOR.

Dans le fichier d'entrée il est maintenant nécessaire de fournir les paramètres supplémentaires suivants:

*Données caractérisant le sol*

- L'albedo du couvert végétal; $\alpha_f$
- L'émissivité du couvert végétal; $\varepsilon_f$
- La fraction du sol ombragée par le couvert végétal; $\sigma_f$
- Un estimé de la température initiale du feuillage; $T_f$
- Le contenu d'eau initial condensée sur les feuilles; $W_{dew}$
- Le contenu d'eau maximal condensable sur les feuilles; $W_{dmax}$
- Rapport du contenu d'eau à partir duquel il y a dessèchement des feuilles sur le contenu d'eau à saturation

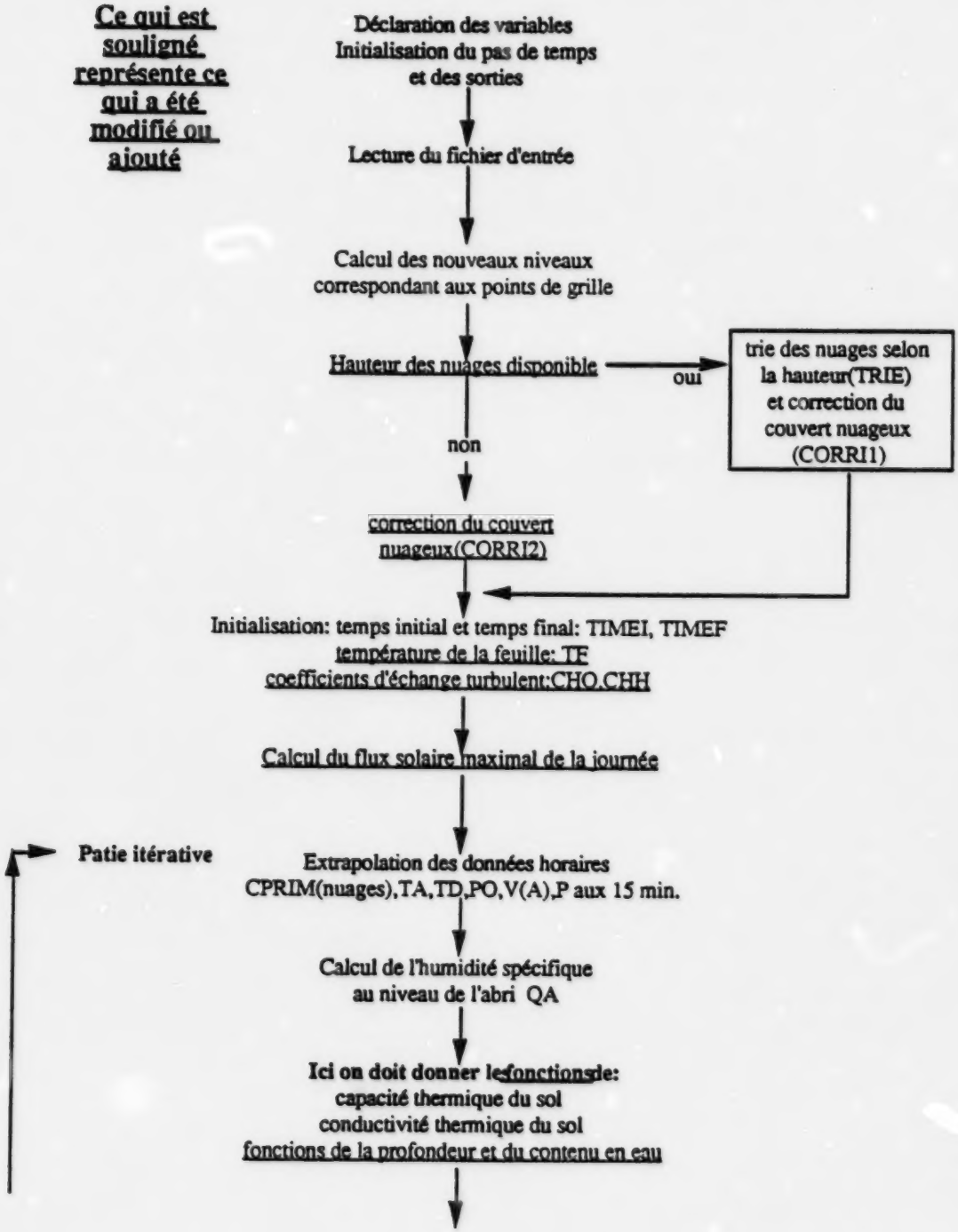
*Données horaires*

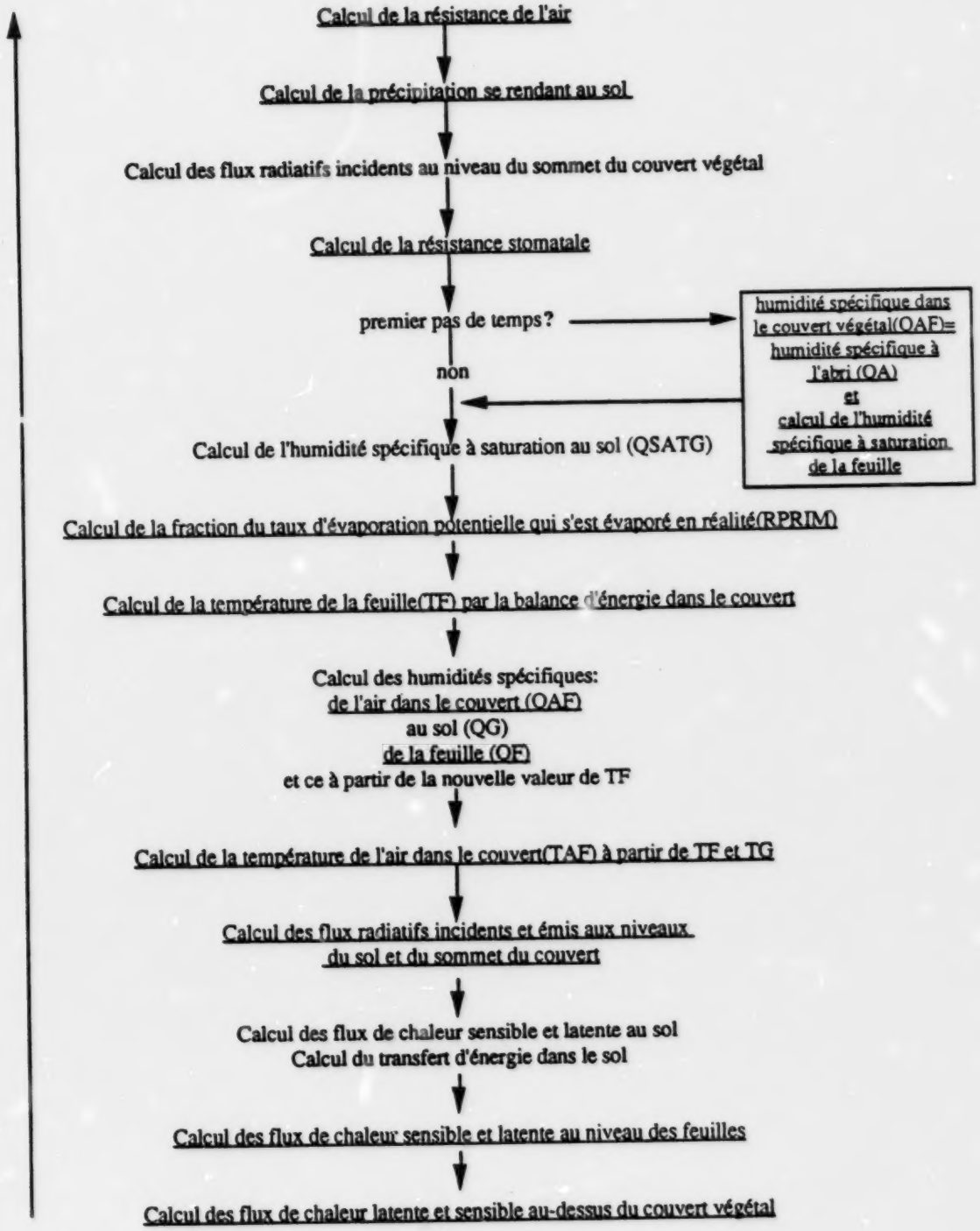
- Température des nuages si disponible
- Hauteur des nuages si disponible

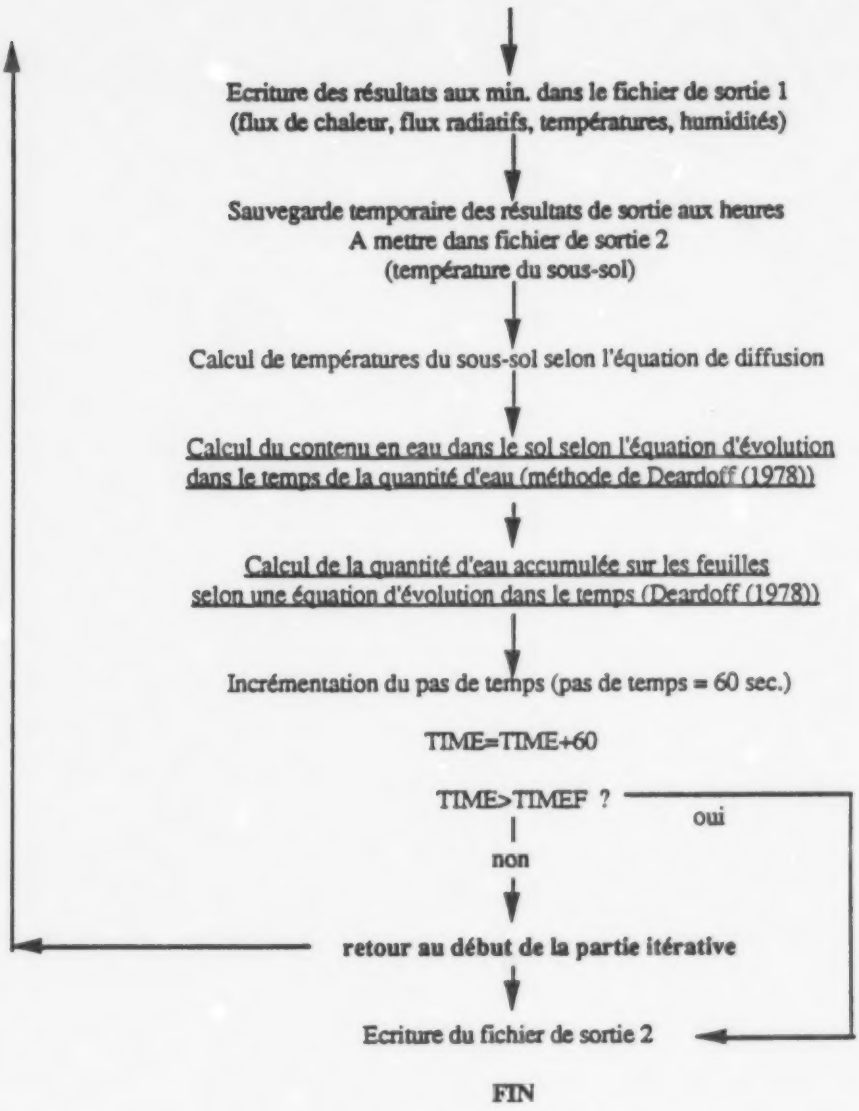
*Et dans le programme il faut fournir :*

Les coefficients de transfert turbulent; $C_{Hh}$ et $C_{Ho}$

ORGANIGRAMME DE LA NOUVELLE VERSION DU PROGRAMME SURFACE.FOR
incluant la paramétrisation du couvert végétal




Calcul de la résistance de l'air
Calcul de la précipitation se rendant au sol
Calcul des flux radiatifs incidents au niveau du sommet du couvert végétal
Calcul de la résistance stomatale
premier pas de temps?
humidité spécifique dans le couvert végétal(QAF)= humidité spécifique à l'abri (QA) et calcul de l'humidité spécifique à saturation de la feuille
non
Calcul de l'humidité spécifique à saturation au sol (QSATG)
Calcul de la fraction du taux d'évaporation potentielle qui s'est évaporé en réalité(RPRIM)
Calcul de la température de la feuille(TF) par la balance d'énergie dans le couvert
Calcul des humidités spécifiques:
de l'air dans le couvert (QAF)
au sol (QG)
de la feuille (QF)
et ce à partir de la nouvelle valeur de TF
Calcul de la température de l'air dans le couvert(TAF) à partir de TF et TG
Calcul des flux radiatifs incidents et émis aux niveaux du sol et du sommet du couvert
Calcul des flux de chaleur sensible et latente au sol
Calcul du transfert d'énergie dans le sol
Calcul des flux de chaleur sensible et latente au niveau des feuilles
Calcul des flux de chaleur latente et sensible au-dessus du couvert végétal


Ecriture des résultats aux min. dans le fichier de sortie 1
(flux de chaleur, flux radiatifs, températures, humidités)
Sauvegarde temporaire des résultats de sortie aux heures
A mettre dans fichier de sortie 2
(température du sous-sol)
Calcul de températures du sous-sol selon l'équation de diffusion
Calcul du contenu en eau dans le sol selon l'équation d'évolution dans le temps de la quantité d'eau (méthode de Deardoff (1978))
Calcul de la quantité d'eau accumulée sur les feuilles selon une équation d'évolution dans le temps (Deardoff (1978))
Incrémentation du pas de temps (pas de temps = 60 sec.)
TIME=TIME+60
TIME>TIMEF ?
oui
non
retour au début de la partie itérative
Ecriture du fichier de sortie 2
FIN

# ORGANIGRAMME DE LA BASE DE CONNAISSANCE

PAR

ANDRÉ COTNOIR
PETER ZWACK

Ce travail fait partie d'une thèse de maîtrise qui a été présentée au département de physique à l'université du Québec à Montréal par André Cotnoir en 1988

# TABLE DES MATIÈRES

Organigramme de la base de connaissance.....1

Annexe 1
Règles de prévision de l'étendue des nuages dans la CLA.....3

Cet partie présente la structure complète de la base de connaissances pour la prévision de nuages bas par les principes physiques. Il s'agit d'une organisation en objets structurés (frames) de la connaissance. L'annexe 1 de cet appendice présente les règles de prévision de l'étendue des nuages bas.

La représentation graphique de ces objets est la suivante. Dans notre exemple (figure C.1);

a) l'étiquette **"profil d'humidité (couche turbulente)"** identifie l'élément de connaissance représenté par l'objet,
b) l'étiquette **"prévision"** indique l'heure d'initialisation de la donnée **(initia. à)**, l'heure du début de la prévision effectuée au moyen de cette donnée **(période déb.)**, et l'heure de validité de la prévision effectuée à partir de cette donnée **(pour)**,
c) l'étiquette **"source"** indique la provenance de la donnée. Pour le système complet OASIS, il est prévu que la provenance des données sera de quatre ordres;

1- données provenant d'**observations régulières** effectuées par l'humain,
2- données provenant de **modèles numériques** prévoyant l'état futur de l'atmosphère,
3- données provenant de **modèles de petites échelles**, par exemple, un modèle local de prévision de la hauteur de la CLT,
4- données provenant de **modèles qualitatifs** tels que celui présenté dans le cadre de ce texte,

5- données provenant de l'**heuristique humaine** (art de deviner) en posant directement une question à l'utilisateur. Par exemple, évaluer qualitativement l'intensité de la turbulence,

d) l'étiquette **"exactitude"** indique le niveau de confiance (en pourcentage) du système envers l'élément de connaissance ,

e) l'étiquette **"limites"** indique la gamme de valeurs possibles que peut prendre l'élément de connaissance (variabilité usuelle),

f) les étiquettes **"valeur-hauteur"** permettent d'instancier l'élément de connaissance **"profil d'humidité (couche turbulente)"** en lui assignant une valeur, dans ce cas-ci une valeur d'humidité variant selon la hauteur.

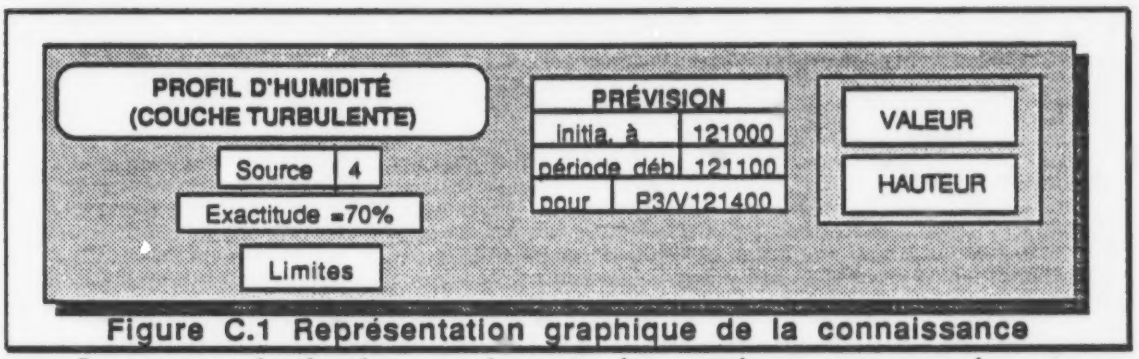


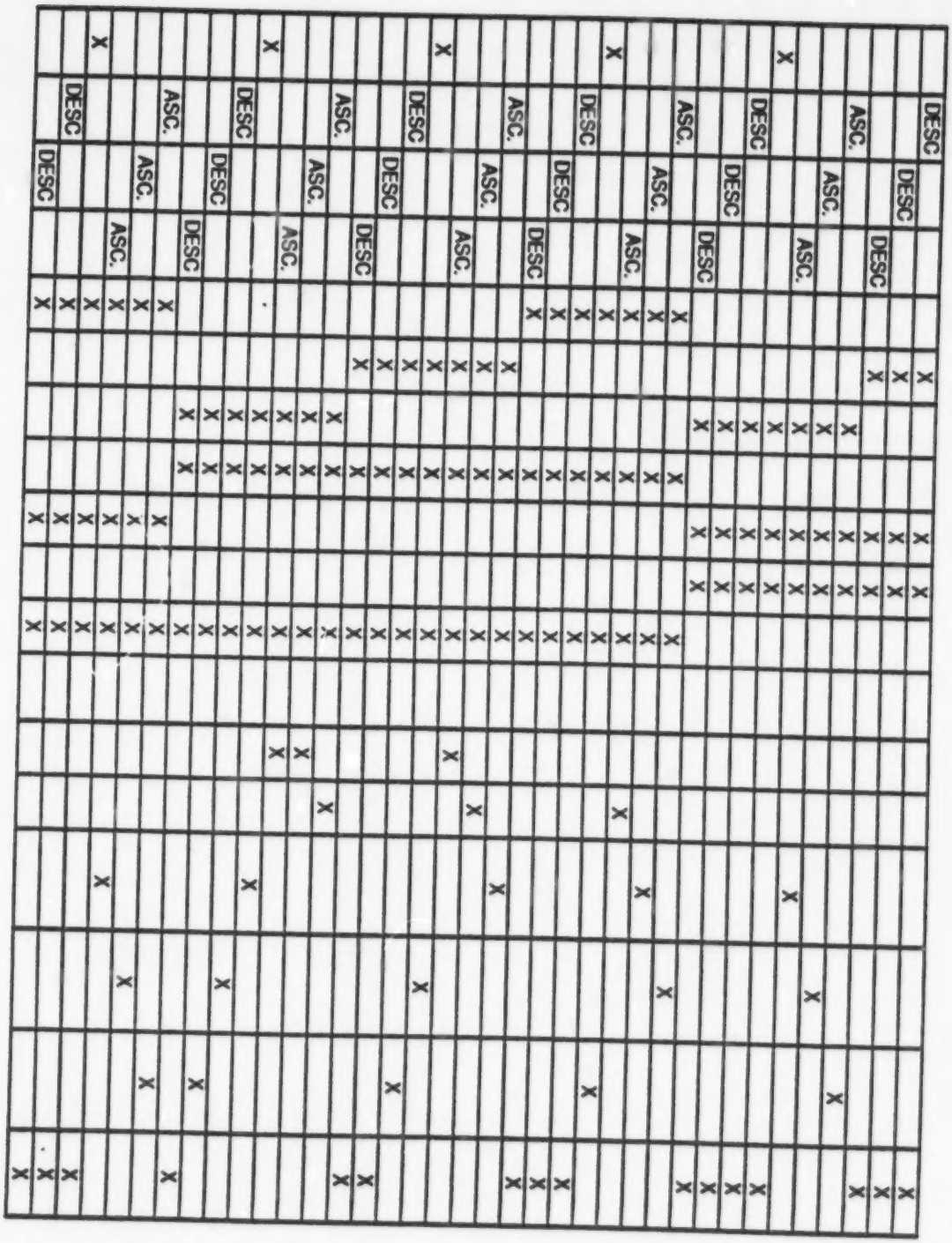

Figure C.1 Représentation graphique de la connaissance

Les zones hachurées représentent les sections programmées et actuellement opérationnelles d'OASIS.

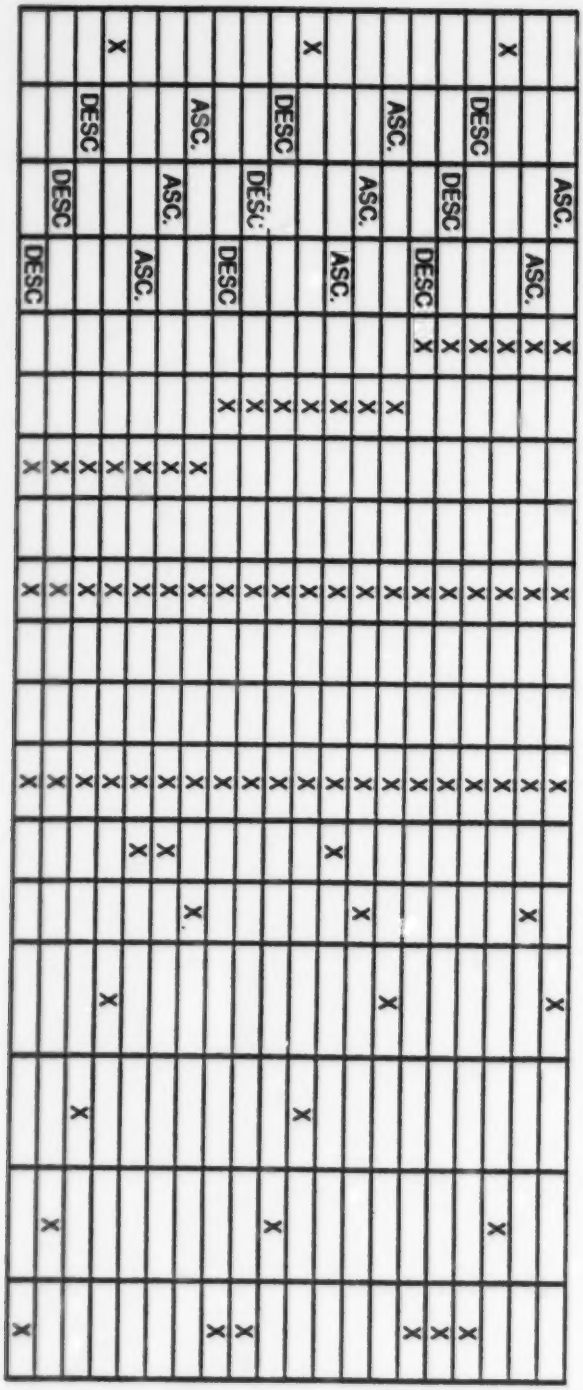
# Annexe 1

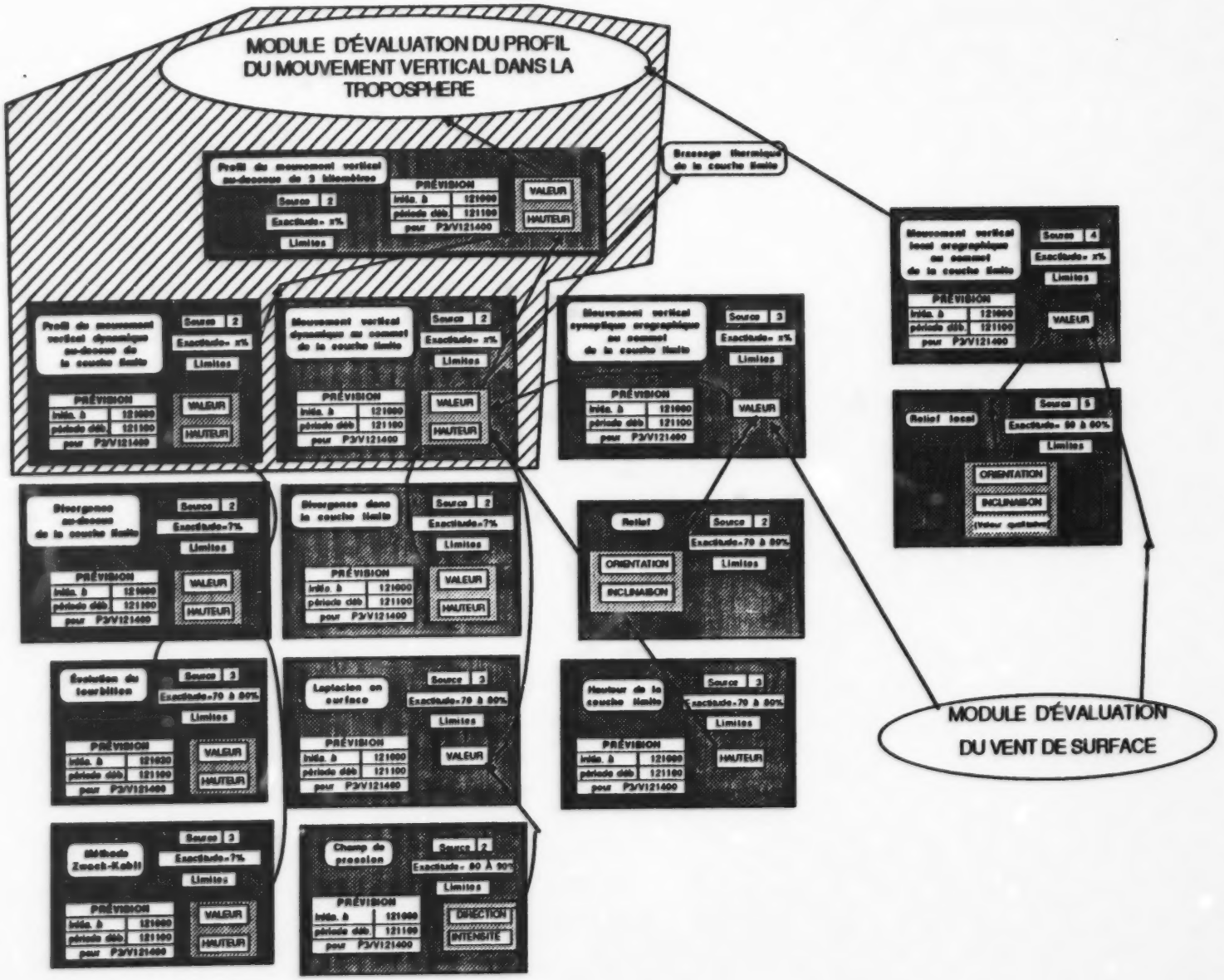
## Règles de prévision de l'étendue des nuages dans la CLA

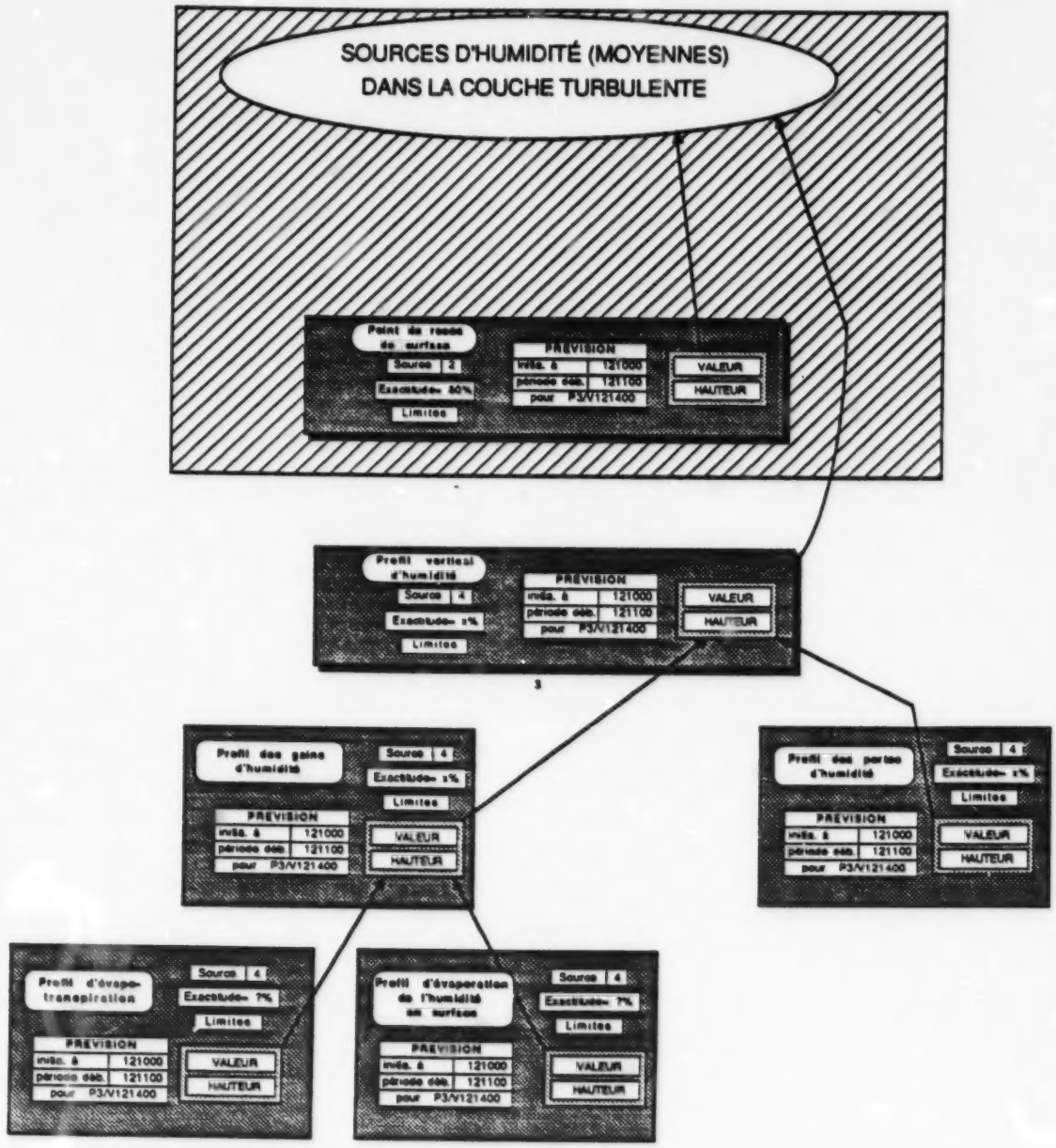
| Mouvement vertical CLA microbar/s | | | | Turb. méc./conv. mètres | | | T - Td °C | | Stabilité au-dessus de la CLA E-3 °K/m | | | ÉTENDUE | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nul | Faib. | Mod. | Fort | Faib. | Mod. | Fort | ≤1 | ≤2 | Faib. ≤-3 | Mod. ≤0 | Fort >0 | OVC | BKN | BKN O SCT | BKN V SCT | SCT O BKN | SCT/CLR | |
| 0 | ≤±2,5 | ≤±5,0 | >±5,0 | <250 | <500 | ≥500 | | | | | | | | | | | | | |
| | | ASC. | | X | | | X | | X | | | | | | | X | | | |
| | | | ASC. | X | | | X | | X | | | | | | X | | | | |
| | | | ASC. | X | X | | X | | X | | | | | X | | | | | |
| X | | | | X | X | | X | | X | | | | | | | | X | | |
| | | DESC | | X | | | X | | X | | | | | | | | X | | |
| | | | DESC | X | | | X | | X | | | | | | | | X | | |
| | | | DESC | | X | | X | | X | | | | | | | | X | | |
| | | ASC. | | | X | | X | | X | | | | | X | | | | | |
| | | | ASC. | | X | | X | | X | | | | X | | | | | | |
| X | | | | | X | | X | | X | | | | X | | | | | | |
| | | DESC | | | X | | X | | X | | | | | | | | X | | |
| | | | DESC | | X | | X | | X | | | | | | | | X | | |
| | | | DESC | | | X | X | | X | | | | | | | | X | | |
| | | ASC. | | | | X | X | | X | | | | | | | | X | | |
| | | | ASC. | | | X | X | | X | | | | | | | | X | | |
| X | | | | | | X | X | | X | | | | | | | | X | | |
| | | DESC | | | | | X | | X | | | | | | | | X | | |
| | | | DESC | | | | X | | X | | | | | | | | X | | |
| | | | DESC | | | | | X | X | | | | | | | | X | | |
| | | ASC. | | | | | | X | X | | | | | | | | X | | |
| | | | ASC. | | | | | X | X | | | | | | | | X | | |
| X | | | | | | | | X | X | | | | | | | | X | | |
| | | DESC | | | | | | X | X | | | | | | | | X | | |
| | | | DESC | | | | | X | X | | | | | | | | X | | |
| | | | DESC | | | | | X | X | | | | | | | | X | | |
| | | ASC. | | | | | | X | X | | | | | | | | X | | |
| | | | ASC. | | | | | X | X | | | | | | | | X | | |
| X | | | | | | | | X | X | | | | | | | | X | | |

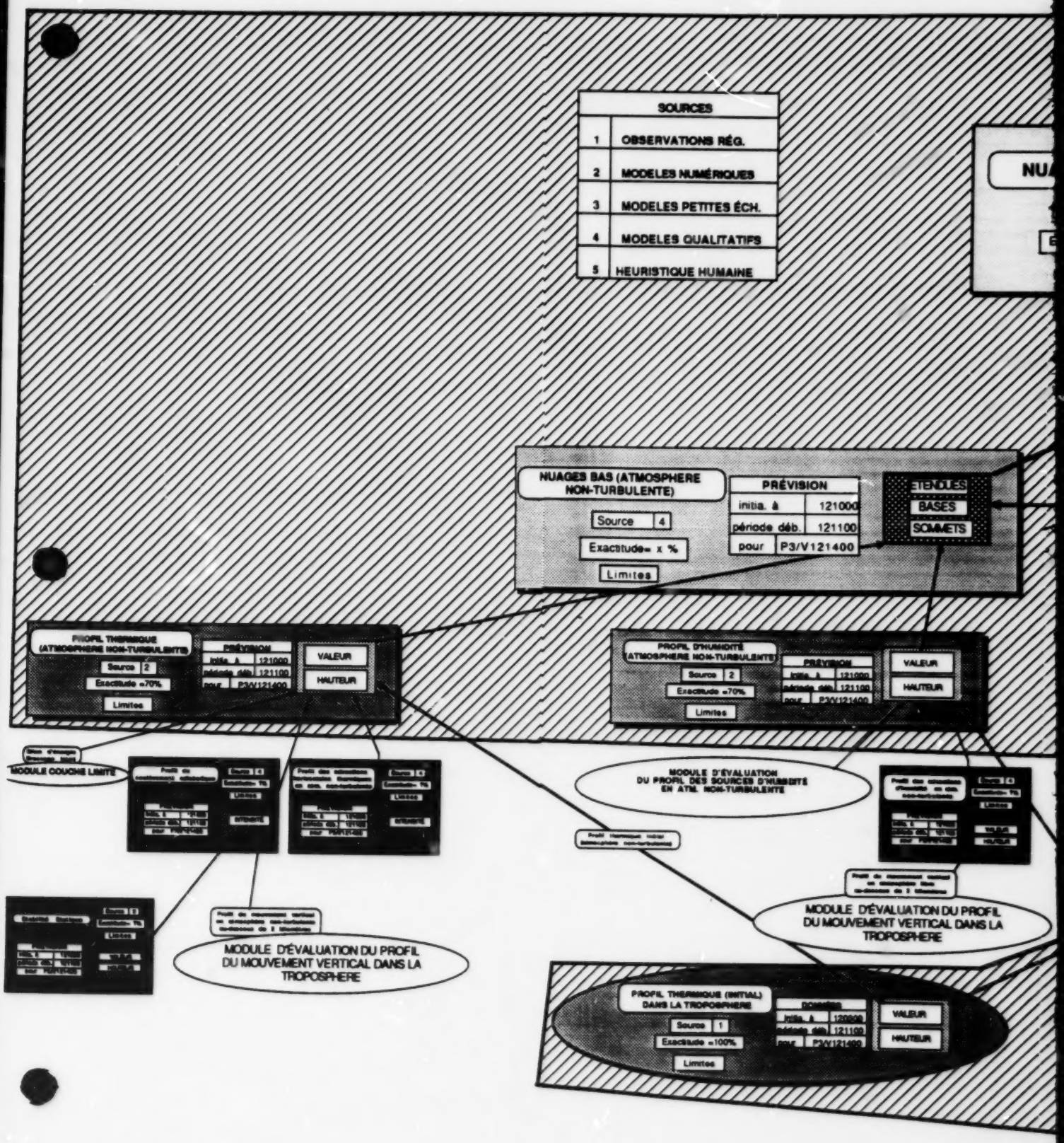


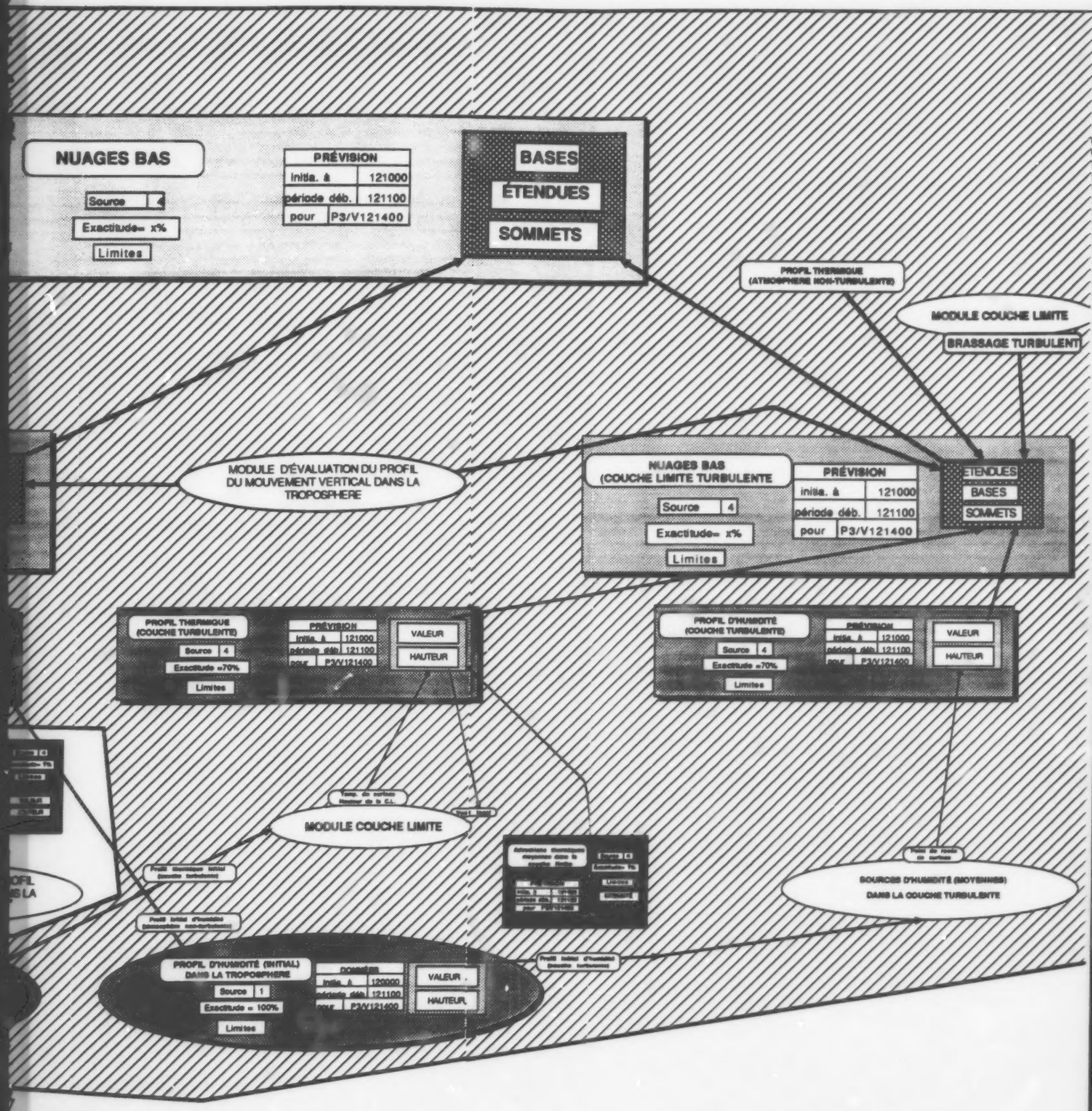
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | DESC | X | | | | X | | X | | | | | | | X |
| | ASC. | | | | X | | | X | | X | | | | | X | | |
| | | ASC. | | | X | | | X | | X | | | | X | | | |
| | | | ASC. | | X | | | X | | X | | | X | | | | |
| X | | | | | X | | | X | | X | | | | | | X | |
| | DESC | | | | X | | | X | | X | | | | | | | X |
| | | DESC | | | X | | | X | | X | | | | | | | X |
| | | | DESC | | X | | | X | | X | | | | | | | X |
| | ASC. | | | | | X | | X | | X | | | | X | | | |
| | | ASC. | | | | X | | X | | X | | | X | | | | |
| | | | ASC. | | | X | | X | | X | | X | | | | | |
| X | | | | | | X | | X | | X | | | | | X | | |
| | DESC | | | | | X | | X | | X | | | | | | X | |
| | | DESC | | | | X | | X | | X | | | | | | | X |
| | | | DESC | | | X | | X | | X | | | | | | | X |
| | ASC. | | | X | | | X | | | | X | | X | | | | |
| | | ASC. | | X | | | X | | | | X | X | | | | | |
| | | | ASC. | X | | | X | | | | X | X | | | | | |
| X | | | | X | | | X | | | | X | | | X | | | |
| | DESC | | | X | | | X | | | | X | | | | X | | |
| | | DESC | | X | | | X | | | | X | | | | | X | |
| | | | DESC | X | | | X | | | | X | | | | | | X |
| | ASC. | | | | X | | X | | | | X | X | | | | | |
| | | ASC. | | | X | | X | | | | X | X | | | | | |
| | | | ASC. | | X | | X | | | | X | X | | | | | |
| X | | | | | X | | X | | | | X | | X | | | | |
| | DESC | | | | X | | X | | | | X | | | X | | | |
| | | DESC | | | X | | X | | | | X | | | | X | | |
| | | | DESC | | X | | X | | | | X | | | | | X | |
| | ASC. | | | | | X | X | | | | X | X | | | | | |
| | | ASC. | | | | X | X | | | | X | X | | | | | |
| | | | ASC. | | | X | X | | | | X | X | | | | | |
| X | | | | | | X | X | | | | X | X | | | | | |
| | DESC | | | | | X | X | | | | X | | X | | | | |
| | | DESC | | | | X | X | | | | X | | | X | | | |
| | | | DESC | | | X | X | | | | X | | | | X | | |
| | ASC. | | | X | | | | X | | | X | | | | X | | |

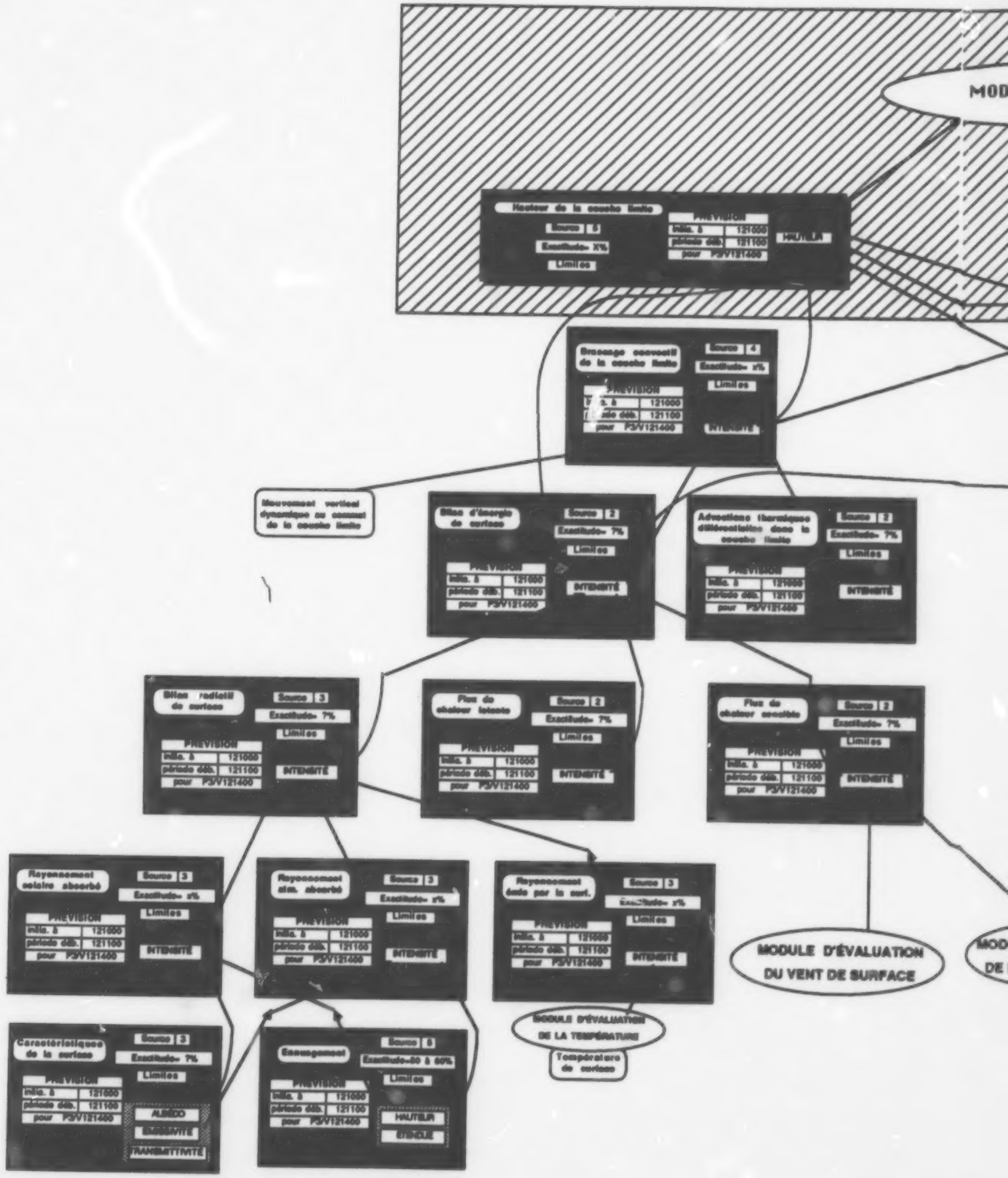

ASC.
ASC.
DESC
DESC
ASC.
ASC.
DESC
DESC
ASC.
ASC.
DESC
DESC
ASC.
ASC.
DESC
DESC

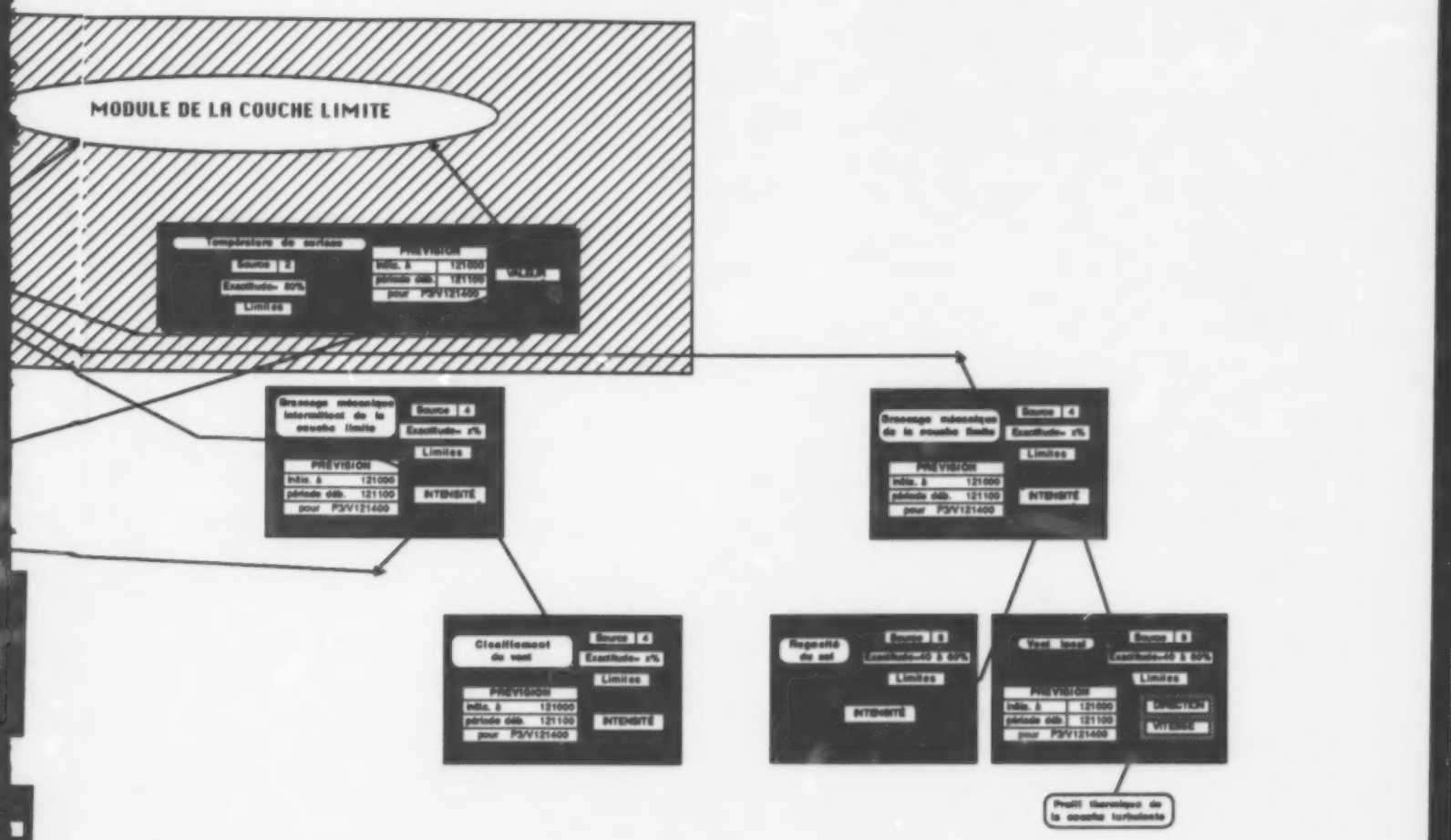

MODULE D'ÉVALUATION DU PROFIL DU MOUVEMENT VERTICAL DANS LA TROPOSPHERE
Brassage thermique de la couche limite
Mouvement vertical local orographique au sommet de la couche limite
Source 4
Exactitude= x%
Limites
PRÉVISION
Initia. à 121000
période déb 121100
pour P3/V121400
VALEUR
Relief local
Source 5
Exactitude= 50 à 60%
Limites
ORIENTATION
INCLINAISON
(Valeur quotient
Profil du mouvement vertical dynamique au-dessous de la couche limite
Source 2
Exactitude= x%
Limites
PRÉVISION
Initia. à 121000
période déb 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
Mouvement vertical dynamique au sommet de la couche limite
Source 2
Exactitude= x%
Limites
PRÉVISION
Initia. à 121000
période déb 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
Mouvement vertical synoptique orographique au sommet de la couche limite
Source 3
Exactitude= x%
Limites
PRÉVISION
Initia. à 121000
période déb 121100
pour P3/V121400
VALEUR
Divergence au-dessus de la couche limite
Source 2
Exactitude=?%
Limites
PRÉVISION
Initia. à 121000
période déb 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
Divergence dans la couche limite
Source 2
Exactitude=?%
Limites
PRÉVISION
Initia. à 121000
période déb 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
Relief
Source 2
Exactitude=70 à 80%
Limites
ORIENTATION
INCLINAISON
Évolution de la turbulence
Source 3
Exactitude=70 à 80%
Limites
PRÉVISION
Initia. à 121000
période déb 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
Laplacien en surface
Source 3
Exactitude=70 à 80%
Limites
PRÉVISION
Initia. à 121000
période déb 121100
pour P3/V121400
VALEUR
Hauteur de la couche limite
Source 3
Exactitude=70 à 80%
Limites
PRÉVISION
Initia. à 121000
période déb 121100
pour P3/V121400
HAUTEUR
Méthode Zeoch-Kabil
Source 3
Exactitude=?%
Limites
PRÉVISION
Initia. à 121000
période déb 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
Champ de pression
Source 2
Exactitude= 80 à 90%
Limites
PRÉVISION
Initia. à 121000
période déb 121100
pour P3/V121400
DIRECTION
INTENSITÉ
MODULE D'ÉVALUATION DU VENT DE SURFACE


SOURCES D'HUMIDITÉ (MOYENNES)
DANS LA COUCHE TURBULENTE
Point de rosée de surface
Source 2
Exactitude= 50%
Limites
PREVISION
VALEUR
HAUTEUR
Profil vertical d'humidité
Source 4
Exactitude= ±%
Limites
PREVISION
invés. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
3
Profil des gains d'humidité
Source 4
Exactitude= ±%
Limites
PREVISION
invés. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
Profil des pertes d'humidité
Source 4
Exactitude= ±%
Limites
PREVISION
invés. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
Profil d'évapo-transpiration
Source 4
Exactitude= ?%
Limites
PREVISION
invés. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
Profil d'évaporation de l'humidité en surface
Source 4
Exactitude= ?%
Limites
PREVISION
invés. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR


SOURCES
1 OBSERVATIONS RÉG.
2 MODELES NUMÉRIQUES
3 MODELES PETITES ÉCH.
4 MODELES QUALITATIFS
5 HEURISTIQUE HUMAINE
NUAGES BAS (ATMOSPHERE NON-TURBULENTE)
Source 4
Exactitude= x %
Limites
PRÉVISION
initia. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
ETENDUES
BASES
SOMMETS
PROFIL THERMIQUE (ATMOSPHERE NON-TURBULENTE)
Source 2
Exactitude =70%
Limites
PRÉVISION
initia. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
PROFIL D'HUMIDITÉ (ATMOSPHERE NON-TURBULENTE)
Source 2
Exactitude =70%
Limites
PRÉVISION
initia. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
MODULE COUCHE LIMITE
MODULE D'ÉVALUATION DU PROFIL DES SOURCES D'HUMIDITÉ EN ATM. NON-TURBULENTE
MODULE D'ÉVALUATION DU PROFIL DU MOUVEMENT VERTICAL DANS LA TROPOSPHERE
MODULE D'ÉVALUATION DU PROFIL DU MOUVEMENT VERTICAL DANS LA TROPOSPHERE
PROFIL THERMIQUE (INITIAL) DANS LA TROPOSPHERE
Source 1
Exactitude =100%
Limites
PRÉVISION
initia. à 120000
période déb. 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR


NUAGES BAS
Source 4
Exactitude= x%
Limites
PRÉVISION
initia. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
BASES
ÉTENDUES
SOMMETS
PROFIL THERMIQUE (ATMOSPHERE NON-TURBULENTE)
MODULE COUCHE LIMITE
BRASSAGE TURBULENT
MODULE D'ÉVALUATION DU PROFIL DU MOUVEMENT VERTICAL DANS LA TROPOSPHERE
NUAGES BAS (COUCHE LIMITE TURBULENTE
Source 4
Exactitude= x%
Limites
PRÉVISION
initia. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
ETENDUES
BASES
SOMMETS
PROFIL THERMIQUE (COUCHE TURBULENTE)
Source 4
Exactitude =70%
Limites
PRÉVISION
initia. à 121000
période déb 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
PROFIL D'HUMIDITÉ (COUCHE TURBULENTE)
Source 4
Exactitude =70%
Limites
PRÉVISION
initia. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR
MODULE COUCHE LIMITE
SOURCES D'HUMIDITÉ (MOYENNES) DANS LA COUCHE TURBULENTE
PROFIL D'HUMIDITÉ (INITIAL) DANS LA TROPOSPHERE
Source 1
Exactitude = 100%
Limites
DONNÉES
initia. à 120000
période déb. 121100
pour P3/V121400
VALEUR
HAUTEUR


Hauteur de la couche limite
Source 5
Exactitude= X%
Limites
PREVISION
HAUTEUR
Brassage convectif de la couche limite
INTENSITÉ
Mouvement vertical dynamique au sommet de la couche limite
Bilan d'énergie de surface
Advections thermiques différentielles dans la couche limite
Bilan radiatif de surface
Flux de chaleur latente
Flux de chaleur sensible
Rayonnement solaire absorbé
Rayonnement atm. absorbé
Rayonnement émis par la surf.
MODULE D'ÉVALUATION
DU VENT DE SURFACE
MODULE D'ÉVALUATION
DE LA TEMPÉRATURE
Température de surface
Caractéristiques de la surface
ALBÉDO
ÉMISSIVITÉ
TRANSMITTIVITÉ
Ennuagement
HAUTEUR
ÉTENDUE


MODULE DE LA COUCHE LIMITE
Température de surface
Source 2
Exactitude= 80%
Limites
Prévision
Init. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
Brassage mécanique intermittent de la couche limite
Source 4
Exactitude= x%
Limites
PRÉVISION
Init. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
INTENSITÉ
Classification du vent
Source 4
Exactitude= x%
Limites
PRÉVISION
Init. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
INTENSITÉ
Rugosité du sol
Source 8
Limites
INTENSITÉ
Vent local
Source 8
Limites
PRÉVISION
Init. à 121000
période déb. 121100
pour P3/V121400
Profil thermique de la couche turbulente
MODULE D'ÉVALUATION DE LA TEMPÉRATURE

# VALIDATION D'UN MODELE QUALITATIF DE DIAGNOSTIC DES NUAGES BAS

PAR

MICHEL DESMARAIS
DENIS JACOB
PETER ZWACK

# TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction....1
2. Description du modèle de diagnostic....2
2.1. La version OASIS....2
2.2. La version OASIS modifiée....3
2.3. La version STRATUS....3
2.3.1. Dépression du point de rosée....4
2.3.2. Hauteur de la couche limite....4
2.3.3. Mouvement vertical....5
2.3.4. Stabilité au-dessus de la couche limite....6
3. Évaluation du modèle de diagnostic....6
3.1. Version OASIS....6
3.2. Version OASIS modifiée....7
3.3. Version STRATUS....7
3.3.1. Cas du 19 septembre à 00Z....8
3.3.2. Cas du 19 septembre à 12Z....10
3.3.3. Cas du 20 septembre à 00Z....11
3.3.4. Appréciation générale de la version STRATUS....11
4. Recommandations....12
5. Commentaires d'un expert-météorologiste sur les sorties du modèle EFR....13
6. Conclusion....17
7. Références....18

## 1. Introduction

Un modèle de diagnostic de nuages bas a été développé et évalué. Ce modèle, appelé STRATUS, résulte de modifications faites sur une version antérieure du modèle nommée OASIS (OASIS, 1988). Ce rapport décrit premièrement la version OASIS du modèle qui utilise quatre paramètres météorologiques dérivés (PMD)[1], provenant des sorties du modèle numérique aux éléments finis régionaux (modèle EFR), pour faire le diagnostic des nuages bas. Ces PMD sont: le profil vertical de la dépression du point de rosée, la hauteur de la couche limite planétaire (CL), la stabilité au-dessus de la CL et le profil vertical du mouvement vertical. L'évaluation de la version OASIS a permis d'identifier certaines lacunes dans le modèle de diagnostic, en particulier l'utilisation exclusive des sorties du modèle EFR comme données d'entrée. La deuxième version, STRATUS, montre qu'un diagnostic plus précis des nuages bas est obtenu en ajoutant au modèle des règles permettant de dériver les quatre PMD, cités plus haut, à partir des observations réelles de vent, de température, de pression et de température du point de rosée.

L'objectif spécifique de ce rapport est d'évaluer l'ensemble de règles développées par Zwack et Cotnoir (Partie C) et qui sont appliquées sur les quatre PMD afin de diagnostiquer les nuages bas. Cette évaluation consiste à vérifier si les règles de diagnostic identifient correctement la couverture nuageuse sur un ensemble de situations météorologiques. Elle vise également une meilleure compréhension du comportement du modèle de diagnostic. Il faut souligner l'importance de cette compréhension du modèle qui est essentielle, à ce stade dans le développement d'un système expert de prévision de nuages bas, afin de faire des choix éclairés quant aux développements futurs.

Pour faire cette évaluation, les règles de diagnostic sont appliquées sur les quatre PMD afin de comparer la couverture nuageuse ainsi obtenue avec la couverture analysée par un expert-météorologiste. Cette évaluation a été faite pour les deux versions du modèle, OASIS et STRATUS. Dans la première version, les règles ont été appliquées sur les PMD provenant directement des sorties du modèle EFR. Dans la deuxième, les mêmes règles de

---

[1]Ces paramètres sont qualifiés de dérivés car il ne sont pas obtenus directement des observations météorologiques.

diagnostic de nuages bas ont été utilisées, mais sur les PMD obtenus à partir d'un ensemble complémentaire de règles appliquées sur des observations réelles.

## 2. Description du modèle de diagnostic

Le modèle de diagnostic de nuages bas est constitué d'un ensemble de 126 règles associées aux différentes combinaisons des quatre PMD suivants:

mouvement vertical (w);

hauteur de la couche limite (sert à caractériser la turbulence);

dépression du point de rosée (T - Td);

stabilité au-dessus de la CL déterminée par le profil vertical de température ($\Delta T/\Delta h$).

L'expression "règles de nuages bas" sera utilisée pour référer à cet ensemble de règles puisque celles-ci permettent d'obtenir la couverture de nuages bas. Les règles de nuages bas appliquées aux PMD, et ce à différents niveaux, déterminent la couverture nuageuse pour chacun de ces niveaux.

Les variantes de ce modèle, pour chacune des versions, sont décrites dans les prochaines sections. La création de ces différentes versions résulte des modifications apportées au modèle, tout au long de son élaboration, suite à l'identification de lacunes dans son diagnostic de nuages bas.

### 2.1. La version OASIS

La version OASIS utilise des PMD tirés des sorties du modèle EFR. La façon d'obtenir ces PMD à partir des sorties du modèle EFR dépend du PMD considéré. Ainsi, la valeur du mouvement vertical à différents niveaux est obtenue directement des sorties du modèle EFR. La hauteur de la couche limite est fixée à 510 m et est constante dans cette version, elle n'est donc pas extraite du modèle EFR. La stabilité au-dessus de la couche limite est évaluée par le profil de température entre le sommet de la CL fixé à 510 m et le niveau 850

mb. La valeur de la dépression du point de rosée doit être modifiée pour pallier au problème de brassage dans la couche limite qui est mal simulé près du temps 0 par le modèle EFR. Pour simuler ce brassage, le profil vertical de température a été modifié, entre le sol et le sommet de la CL, de façon à lui faire suivre l'adiabatique sèche tout en conservant la valeur de la température moyenne de la couche. Le profil de la température du point de rosée a été modifié de façon à obtenir un rapport de mélange constant sur la couche en conservant la quantité totale d'eau dans la couche.

## 2.2. La version OASIS modifiée

Parce que le brassage de la CL tel que décrit à la section précédente ne peut s'appliquer correctement à toutes les situations météorologiques rencontrées, une version non-brassée du modèle a aussi été développée. Cette version reprend les caractéristiques de la version brassée à l'exception des profils de température et de température du point de rosée qui sont directement obtenus du modèle EFR.

## 2.3. La version STRATUS

Dans cette version, les PMD sont calculés à partir d'observations réelles. Ces observations réelles seront appelées paramètres météorologiques de base (PMB), puisqu'ils sont directement mesurés. Ces paramètres sont: le profil vertical du vent, la pression au sol, la tendance de pression au sol, les profils verticaux de la température et de la température du point de rosée. Les PMD sont dérivés des PMB à l'aide d'un ensemble complémentaire de règles appelé "règles des paramètres dérivés". Dans la version STRATUS, en plus de calculer les PMD à partir des PMB, l'utilisation des PMD dans les règles de nuages bas se fait de façon légèrement différente. En particulier, le calcul de la stabilité et l'évaluation de la turbulence à partir de la hauteur de la couche limite sont modifiés. Les prochaines sous-sections présentent comment les PMD sont obtenus pour STRATUS.

### 2.3.1. Dépression du point de rosée

La dépression du point de rosée est calculée directement pour chacun des niveaux rapportés sur le sondage aérologique. Les valeurs entre les différents niveaux sont obtenues par une interpolation simple faite entre les niveaux.

### 2.3.2. Hauteur de la couche limite

La hauteur de la CL sert en principe à évaluer la turbulence, toutefois, ce PMD s'avère un mauvais indicateur de la turbulence dans plusieurs cas. Pour pallier à ce problème, le nombre de Richardson a été introduit comme nouvel indicateur de la turbulence. Le nombre de Richardson $R_i$ est défini par l'expression suivante

$$R_i = \frac{g}{\theta_{moyen}} \cdot \frac{(\theta_s - \theta_b)(z_s - z_b)}{(\Delta u)^2 + (\Delta v)^2},$$

où: $g$ = contante gravitationnelle,

$\theta_{moyen} = \frac{\theta_s + \theta_b}{2}$,

$\theta_s$ = température potentielle au sommet de la couche,

$\theta_b$ = température potentielle à la base de la couche,

$z_s$ = hauteur du sommet de la couche,

$z_b$ = hauteur de la base de la couche,

$\Delta u = u_s - u_b$,

$\Delta v = v_s - v_b$,

$u_s$ = composante u au sommet de la couche,

$u_b$ = composante u à la base de la couche,

$v_s$ = composante v au sommet de la couche,

$v_b$ = composante v à la base de la couche.

Toutes ces valeurs peuvent être obtenues des sondages aérologiques sauf la température potentielle qui est donnée par

$$\theta = T\left[\frac{p_0}{p}\right]^{\chi}$$

où:

T = température en Kelvin,

p = pression au niveau calculé,

$p_0$ = 1000 mb,

$\chi = R/c_p = 0.286$ = constante.

Le nombre de Richardson permet de qualifier la turbulence de la façon suivante:

| | |
|---|---|
| $R_i \leq 0.5$ | turbulence forte, |
| $0.5 \leq R_i \leq 1.0$ | turbulence modérée, |
| $R_i > 1.0$ | turbulence faible ou nulle. |

### 2.3.3. Mouvement vertical

Le mouvement vertical est évalué en utilisant une version simplifiée de la technique de Zwack et Kabil (1988). Le laplacien du champ de pression est utilisé pour évaluer le mouvement vertical dans la CL et le laplacien du champ de tendance de pression permet d'évaluer le mouvement vertical dans la basse atmosphère libre jusqu'à environ 700 mb. Dans cette version simplifiée de la méthode, les contributions au mouvement vertical de l'orographie et de l'advection du tourbillon géostrophique sont négligées.

### 2.3.4. Stabilité au-dessus de la couche limite

Dans la version STRATUS, la stabilité n'est plus évaluée au-dessus de la couche limite mais plutôt au-dessus de la couche d'intérêt, c'est-à-dire la couche où les règles de nuages bas sont appliquées. Dans le cas d'une inversion, la stabilité est évaluée dans la couche même où les règles sont appliquées.

## 3. Évaluation du modèle de diagnostic

Dans cette section, la performance des trois versions du modèle de diagnostic de nuages bas sont évaluées.

### 3.1. Version OASIS

Essentiellement, le processus de diagnostic consiste à appliquer, à différents niveaux, les 126 règles de nuages bas sur les PMD, obtenus des sorties du modèle EFR, pour en tirer une séquence de couvertures nuageuses en fonction de l'altitude et de réencoder cette séquence sous forme de FT.

Voici les problèmes qui ont été soulevés par l'expert météorologiste lors de l'évaluation de cette version du modèle.

Le brassage de la couche limite effectué dans la version OASIS avait pour but de corriger la simulation incorrecte des effets de CL du modèle EFR. Ce brassage, tel qu'il est fait, a toujours pour effet de diminuer l'humidité près du sol et de l'augmenter en altitude et ainsi de soulever la base du nuage. Un autre effet de ce brassage est de modifier la stabilité au-dessus de la CL, à cause de la discontinuité créée dans les profils de T et de $T_d$. Ce critère, qui est utilisé comme PMD a un impact marqué sur la couverture nuageuse déterminée par les règles. La hauteur de la CL fixée à 510 m a aussi un impact fort sur la turbulence et par le fait même sur la couverture nuageuse.

### 3.2. Version OASIS modifiée

Cette version est essentiellement la même que la version OASIS sauf que le brassage dans la CL a été supprimé. Lors de l'évaluation, l'abolition du brassage n'a pas eu d'effet marquant. L'influence de la hauteur de la CL fixée à 510 m continue d'avoir un impact important sur la couverture nuageuse. Les résultats obtenus lors de l'évaluation de cette version ont soulevés des doutes quant à la fiabilité des sorties du modèle EFR pour effectuer l'évaluation des règles de nuages bas.

Globalement, les versions OASIS et OASIS modifiées manquent de souplesse pour pouvoir être appliquées correctement à différentes situations météorologiques. Les couvertures nuageuses observés sont plausibles mais semblent être sensibles aux valeurs des PMD tirés des sorties du modèle EFR.

### 3.3. Version STRATUS

L'utilisation des sorties du modèle EFR pour évaluer les règles de nuages bas cause certains problèmes quant à l'identification des sources d'erreurs. Lors de mauvais diagnostic de nuages, deux éléments peuvent être suspectées: les règles de nuages bas ou les sorties du modèle. A cause de ces deux sources possibles d'erreurs lors de l'utilisation des sorties du modèle EFR, les règles de nuages bas furent appliquées sur des observations réelles (sondages et observations horaires). En comparant les nuages ainsi obtenus avec les nuages observés, les lacunes dans les règles de diagnostic de nuages bas peuvent être plus facilement identifiées. Les résultats de l'analyse des cas du 19 septembre à 00Z et à 12Z ainsi que pour le 20 septembre à 00Z sont regroupés sur le tableau 1. Le tableau 2 présente les observations de nuages faites aux stations de Maniwaki (WMW), Ste-Agathe (WOH) et de Petawawa (YWA).

### 3.3.1. Cas du 19 septembre à 00Z

Pour le cas du 19 septembre à 00Z, on remarque que les règles donnent trop de nuages près de la surface. Ici il faut préciser que bien que l'on soit dans la couche limite, le nombre de $R_i$ élevé et la forte stabilité dans cette couche laisse peu de place pour la turbulence et la

| hauteur | mouv. vert. omega (Pa/s) | turbulence h* | turbulence Ri | T-Td(°C) | dT/dh(°C/km) dans la couche limite | dT/dh(°C/km) au-dessus de la couche limite | FT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **WMW 89091900Z:** | | | | | | | |
| SFC | Faible des.(0.04) | 0 | 7.3 | 1.0 | 83 | 32 | BKN |
| 29m | Faible des.(0.04) | 0 | 7.3 | 3.0 | 83 | 32 | sommet(T-Td>3) |
| 48m | Faible des.(0.04) | 0 | 3.8 | 4.3 | 32 | -9.4 | CLR |
| 74m | Faible des.(0.04) | 0 | 3.8 | 6.0 | 32 | -9.4 | sommet(T-Td>6) |
| 104m | Faible des.(0.04) | 0 | 0.7 | 8.0 | -9.4 | 0 | CLR |
| 1385m | Faible des. | 0 | oo | 2.1 | 0 | +1 | SCT/CLR |
| 1428m | Faible des. | 0 | 16.8 | 2.9 | 1 | -7.8 | SCT/CLR |
| 1629m | Faible des. | 0 | 13.5 | 8.0 | -7.8 | — | CLR |
| **FT: C0 BKN 45 BKN VRBL C0 BKN** | | | | | | | |
| **WMW 89091912Z** | | | | | | | |
| SFC | Faible des.(0.07) | 0 | 1.5 | 0 | 12.5 | 25 | BKN |
| 16m | Faible des.(0.07) | 0 | 6.7 | 0.1 | 25 | 84 | BKN |
| 64m | Faible des.(0.07) | 0 | 4.6 | 0 | 84 | 35 | BKN |
| 90m | Faible des.(0.07) | 0 | 6.0 | 0 | 35 | 5 | BKN |
| 135m | Faible des.(0.07) | 0 | 0.86 | 0 | 5 | -3.3 | SCT/CLR |
| 531m | Faible des.(0.07) | 0 | 4.4 | 1.1 | -3.3 | -8.3 | BKN V SCT |
| 653m | Faible des.(0.07) | 0 | 16.5 | 6 | -8.3 | +.7 | sommet |
| 1428m | Faible des.(0.07) | 0 | 8.6 | 4.7 | .7 | — | CLR |
| **FT: C0 BKN 22** | | | | | | | |
| **WMW 89092000Z** | | | | | | | |
| SFC | Faible des.(0.07) | 0 | .16 | 4.7 | -5.3 | -5.2 | CLR |
| 38m | Faible des.(0.07) | 0 | .51 | 4.8 | -5.2 | -8.2 | CLR |
| 348m | Faible des.(0.07) | 0 | .83 | 6.0 | -8.2 | -8.1 | CLR |
| 640m | Faible des.(0.07) | 0 | .83 | 2.0 | -8.2 | -8.1 | SCT/CLR |
| 713m | Faible des.(0.07) | 0 | .83 | 1.0 | -8.2 | -8.1 | SCT/CLR |
| 714m | Faible des.(0.07) | 0 | 3.5 | 1.0 | -8.1 | -1.3 | BKN |
| 1110m | Faible des. | 0 | 9.6 | 0.1 | -1.3 | 0 | BKN |
| 1241m | Faible des. | 0 | 9.6 | 6.0 | -1.3 | 0 | sommet: T-Td>=6 |
| 1263m | Faible des. | 0 | oo | 7.0 | 0 | 0 | CLR |
| 1406m | Faible des. | 0 | 36 | 9.0 | 0 | — | CLR |
| **FT: C20 BKN 41** | | | | | | | |

Tableau 1. Diagnostic avec données réelles, WMW 19-09-89.

| | WMW (Maniwaki) | WOH (Ste. Agathe) | YWA (Petawawa) |
|---|---|---|---|
| 18 22Z | — | 30 SCT(Cu1) | CLR |
| 18 23Z | — | /SCT | CLR |
| 19 00Z | /SCT | /SCT | CLR |
| 19 01Z | — | CLR | CLR |
| 19 10:00Z | — | -X 0F (F9) | CLR (Shallow fog) |
| 19 10:19Z | — | — | 1SCT/SCT 4F |
| 19 11:00Z | — | -X 0F (F9) | 1SCT 80 SCT 3F |
| 19 11:08Z | — | — | -X 1 SCT 80 SCT/SCT 1F |
| 19 11:24Z | — | — | -X 80 SCT 1/4F |
| 19 11:45Z | — | — | 36 SCT 3F |
| 19 12:00Z | E2 BKN 3/8F | -X E100 BKN /BKN 1/2F(F4) | 1 SCT 36 SCT 4F |
| 19 12:15Z | — | -X 100 SCT /-BKN 11/2F (F1) | — |
| 19 13:00Z | — | 45 SCT E100 BKN 6F (SC2) | 5 SCT 6FH |
| 19 22:00Z | — | M64 BKN (SC8) | E35 BKN |
| 19 23:00Z | — | M68 BKN (AC7) | 30 SCT E100 BKN |
| 20 00:00Z | /SCT | 70 SCT (AC1) | 30 SCT E100 BKN |
| 20 01:00Z | — | 120 SCT (AC1) | 30 SCT 100 SCT |

Tableau 2. Observations de nuages bas pour trois stations.

table de règles en atmosphère non turbulent a été choisie. Ce choix étant réaliste, on peut penser que les couvertures que la table donne lorsque le mouvement vertical est subsident sont un peu trop fortes surtout que l'atmosphère n'est pas saturée. Pour ce qui est de la 2ème couche de nuages à 4500 pieds, elle est SCT/CLR tel qu'observé autour de WMW. Seule la hauteur diffère, 4500 pieds au lieu de 3000 pieds à WOH. L'observation de la hauteur des nuages épars est estimée (WOH étant 740 pieds plus élevé que WMW), il est normal que la base du nuage soit plus basse de 740 pieds. Opérationnellement un expert-météorologiste aurait mis la base du nuage plus près de 4000 pieds que de 3000 seulement en regardant le sondage. De plus il n'aurait pas mis de nuage en surface, mais s'attendrait à en voir apparaître tôt ou tard. Les règles ici ne sont donc pas bien loin de la réalité sauf peut-être pour l'excédent de nuages à la surface.

### 3.3.2. Cas du 19 septembre à 12Z

Le cas du 19 septembre à 12Z est représentatif d'une situation de brouillard de radiation. On remarque d'abord que les règles en donnent elles aussi et qu'elles ont probablement raison de commencer la couche à la surface. Cependant le plafond est défini comme étant la

visibilité verticale, il dépendra donc de la densité du brouillard ainsi que de son épaisseur, il sera donc à la surface seulement si la visibilité verticale est inférieure à 100 pieds. Un indice que le brouillard n'est pas très dense est la valeur de 0.1 pour T-Td à 16m et la présence de mouvement subsident. La hauteur suivante où l'air redevient saturé est à 64m ou 210 pieds, ce qui est beaucoup plus près de la valeur estimée de 200 pieds à WMW à 12Z. Aux stations environnantes on peut voir que le brouillard n'est pas très épais car il ne permet pas de former un plafond. De plus, à 12Z les visibilités horizontales à toutes les stations sont supérieures à 3/8 de mille, ce qui, ici encore, laisse sous-entendre que le brouillard n'est pas très dense à la surface. Ici aussi, les règles ne sont pas bien loin de la réalité.

### 3.3.3. Cas du 20 septembre à 00Z

Ce cas est presqu'un cas de couche limite turbulente mais le refroidissement nocturne a déjà débuté. On remarque ici que tant que l'on reste dans la portion turbulente de la couche, même si T-Td est entre 1 et 2 degrés les règles donnent SCT/CLR qui va bien avec les observations. Cependant lorsque l'on arrive dans la couche non-turbulente on a le choix d'utiliser la table de règles avec turbulence faible, ce qui donnerait une couverture de SCT/CLR, tandis que si l'on prend la table en atmosphère non-turbulente on obtient BKN ce qui fait un saut quantique entre les deux tables. Encore une fois la table non-turbulente avec mouvement subsident semble donner une couverture trop élevée et surtout lorsque l'air n'est pas complètement saturée. La hauteur est assez près de la hauteur qu'aurait donné un prévisionniste (20-25) mais contrairement au cas du 19 septembre à 00Z, les observations des environs donnent une hauteur plus haute que celle du sondage.

### 3.3.4. Appréciation générale de la version STRATUS

La table de règles avec couche limite turbulente donne des couvertures de nuages qui s'approchent passablement de la réalité. Cependant la table non-turbulente, lorsque le mouvement vertical est subsident, semble donner une couverture nuageuse trop importante. Il y a même un saut quantique dans la quantité de nuages donnée par les deux tables à un endroit où la différence devrait être minime. C'est seulement lorsque $T-T_d=0$ que la table non-turbulente donne de bons résultats dans les cas de subsidence. Le nombre de

Richardson est un meilleur indicateur de la turbulence que la hauteur de la couche limite dans les situations analysées. Il faut cependant souligner que le nombre de Richardson ne peut discriminer les couches adiabatiques sèches turbulentes des non-turbulentes. Ces couches sont toujours turbulentes selon le nombre de Richardson, ce qui n'est pas le cas lorsque la convection s'éteint le soir. D'autres critères doivent être utilisés dans de telles situations.

Pour les cas étudiés, on remarque que le critère de stabilité au-dessus de la couche limite s'applique mal lorsqu'il y a des inversions dans lesquelles un fort cisaillement du vent crée de la turbulence intermittente. Dans de telles situations, seules les particules d'air près du sommet de l'inversion peuvent atteindre la couche au-dessus de l'inversion. Pour ces inversions avec turbulence intermittente, on obtient de meilleurs résultats avec la table turbulente et en utilisant la stabilité de l'air juste au-dessus du niveau étudié. Cette technique peut aussi être utilisée dans les cas où le profil de température s'approche de la neutralité, l'impact n'apparaissant que près de l'inversion se trouvant normalement au sommet de telles couches.

Tous les cas avec mouvement ascendant dans les bas niveaux étaient trop secs pour donner des nuages, il est donc difficile en ce moment d'évaluer cette portion des tables de couverture.

## 4. Recommandations

Bien que l'analyse effectuée soit sommaire, un certains nombre de recommandations peuvent être faites sur les règles de diagnostic.

### Ajouter des catégories pour $T\text{-}T_d$.

La catégorisation de la dépression du point de rosée est présentement limitée à deux valeurs (trois en réalité: <=1, <=2 et >2, mais la dernière implique nécessairement un ciel clair). Cette table s'avère incomplète dans certaines situations et en particulier dans l'intervalle [0,1].

### Établir un critère d'opacité.

Il s'avère important de tenir compte de l'opacité des nuages pour établir le sommet et la base des nuages ainsi que la visibilité au sol (en particulier dans les cas de plafond très bas).

**Redéfinir le traitement de la couche limite et de la stabilité.**
Même si des progrès ont été réalisés vers une meilleure utilisation des paramètres de couche limite et de stabilité, un traitement plus sophistiqué de ces paramètres est souhaité. Voici quelques principes à suivre:

**La hauteur de la couche limite ne doit pas être un paramètre en soi.**
La hauteur de la couche limite est le reflet d'un ensemble de paramètres tel que la turbulence et le profil de température. Or, il s'avère plus adéquat de considérer ces paramètres individuellement. Ceci éviterait, entre autres, d'avoir deux ensembles de règles (un ensemble pour la CL turbulente et un ensemble pour l'atmosphère libre).

**La stabilité doit être considérée à deux niveaux.**
La stabilité est un facteur qui influe à deux niveaux: dans la couche étudiée et dans la couche juste au-dessus. Il faut développer une méthode permettant de définir à quel niveau, dans la couche au-dessus de la région analysée, la stabilité doit être calculée.

**La stabilité doit être mesurée relativement à une adiabatique.**
La stabilité est présentement évaluée par la variation de température avec la hauteur. Or elle dépend en réalité de l'écart entre le profil de température et l'adiabatique sèche ou mouillée.

**La température devrait être un paramètre considéré.**
Telles que définies, les règles des nuages bas ne sont valides que dans une certaine gamme de température. Un ensemble de règles étendues devrait inclure la température comme paramètre.

## 5. Commentaires d'un expert-météorologiste sur les sorties du modèle EFR

L'évaluation des règles de nuages bas à partir des sorties du modèle EFR révèle que le degré de précision des sorties peut être inadéquat pour servir de base au modèle de diagnostic de nuages bas. A cause de l'influence de cette précision sur le diagnostic de

nuages bas, les sorties du modèle EFR furent comparées aux observations provenant de sondages aérologiques afin d'en évaluer qualitativement la précision. Voici les conclusions de cette évaluation des sorties du modèle EFR faite par un expert météorologiste.

Le modèle prédit grossièrement les tendances mais avec une précision souvent insuffisante. De manière générale, le modèle prédit l'allure très générale des courbes de T et Td. Cependant, il est sujet à des erreurs fréquentes de 4 à 5 degrés. De plus, les phénomènes de refroidissement, d'assèchement ou d'humidification rapides avec l'altitude ne sont pas bien simulés. Les profils verticaux de T et Td du modèle sont relativement lisses et sans changements rapides. Pour STRATUS, le manque de précision peut être suffisamment élevé pour entraîner des erreurs de couverture importantes.

Les phénomènes en-dessous de 500m ne sont pas bien simulés. Il est évident que les phénomènes de couche limite ne sont pas correctement simulés par le modèle numérique. Ce problème est particulièrement aigu dans le cas des inversions nocturnes.

Le modèle fluctue avant la prévision de 12h. On remarque que les prévisions de 12h et 24h sont plus près de la réalité que ne le sont les "prévisions" de 0h. Ceci suggère qu'il existe un problème d'ajustement ("spin-up") dans le modèle entre 0h et 12h et de bruits résiduel pour certains champs. En particulier, ce comportement est très facile à identifier dans le champ de mouvement vertical. Le mouvement vertical à t = 0 est trop faible dû à l'initialisation aux modes normaux qui, entre autre, ne tient pas compte de certains effets "physiques". On voit donc une modification importante du champ de mouvement vertical dans les 9 premières heures environ, heures durant lesquelles les effets physiques s'introduisent dans le modèle. Après cette période de "spin-up", des oscillations rapides et de faible amplitude, de l'ordre de 1 $\mu bar\ s^{-1}$, sont observées. Ces oscillations peuvent avoir un impact important lorsque le mouvement vertical est très faible ce qui, malheureusement, est souvent le cas. Selon les informations actuellement disponibles, le mouvement vertical dans le modèle EFR serait obtenu par l'intégration de la divergence du sommet de l'atmosphère jusqu'au niveau considéré. Les valeurs dérivées pour les basses couches atmosphériques se trouvent à intégrer ainsi toutes les perturbations présentes aux niveaux supérieurs. Afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle l'intégration de la divergence à partir de la surface plutôt que du sommet de l'atmosphère diminuerait le bruit observé dans le

champ du mouvement vertical, une nouvelle méthode d'intégration de la divergence a été développée. Malheureusement, les résultats obtenus ne démontrent aucune diminution dans le bruit résiduels.

Un exemple de ce problème de "spin-up" se trouve à la figure 1 où le mouvement vertical du modèle EFR est présenté à intervalles de trois heures au niveau 700mb. Pendant les trois premières heures, l'amplification de l'intensité du mouvement vertical ainsi qu'une trajectoire inusité de la position des maximums sont observées. Le maximum se déplace du sud-est de l'état de New-York sur le Prog. 00 heure au sud-ouest du Nouveau-Brunswick sur le Prog. 03 heures présentés à la figure 1. Ceci fait une vitesse d'environ 130 noeuds pour cette période de 3 heures. Le même maximum se retrouve sur l'Ile du Prince Édouard 3 heures plus tard, ce qui ne fait plus qu'une vitesse de 60 noeuds.

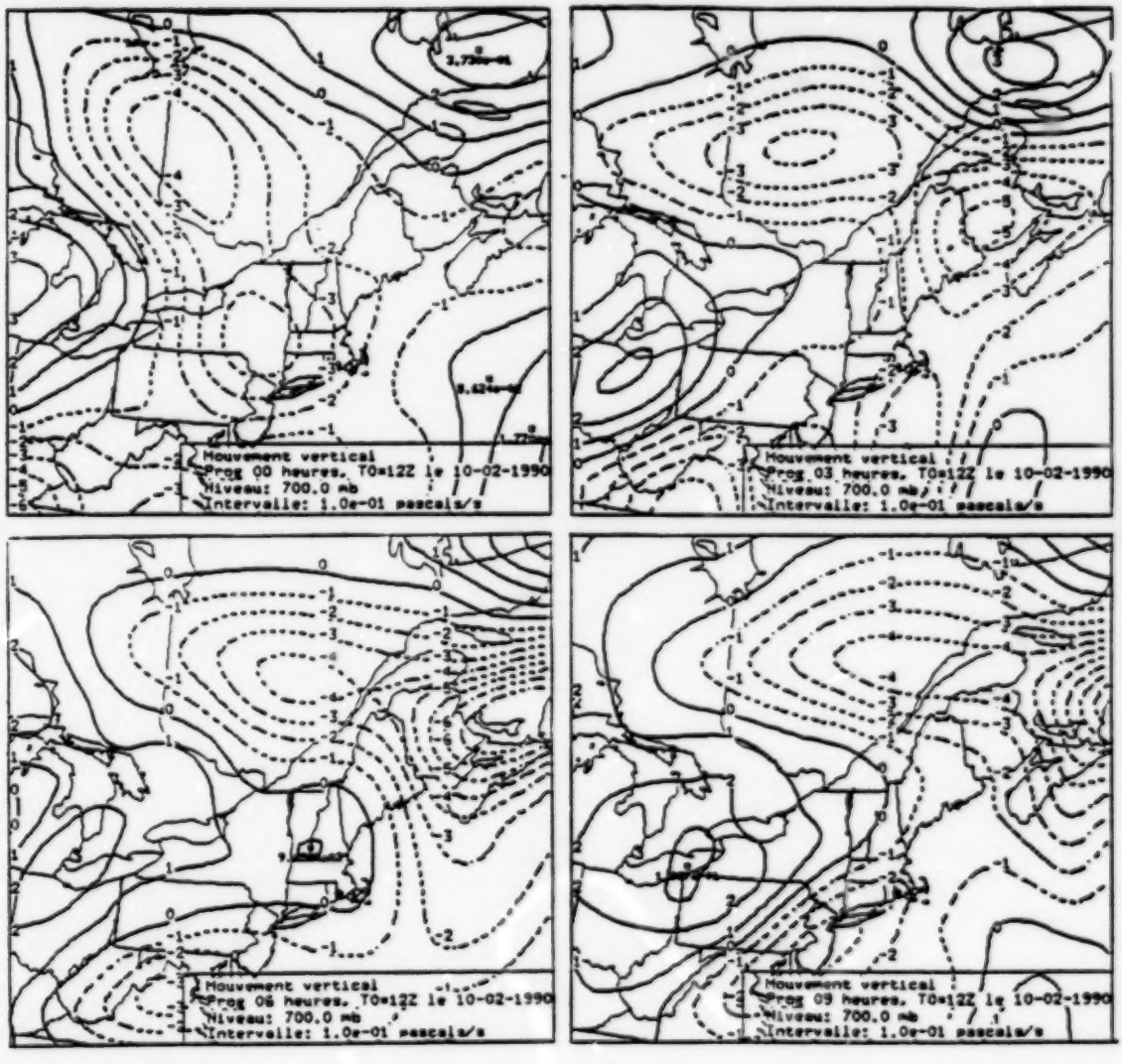



Fig. 1. Mouvement vertical du modèle EFR pour le 10-02-90 au niveau 700mb.

## 6. Conclusion

Les règles de diagnostic de nuages bas de la version STRATUS donnent, en général, des couvertures qui ne sont pas très loin de la réalité. Elles semblent donc former une base intéressante pour le développement d'un système expert de prévision de nuages bas. Une attention particulière doit être apportée sur les sorties du modèle EFR et ce spécialement dans les 9 premières heures. L'évaluation de la turbulence ne peut s'effectuer seulement à partir de la hauteur de la couche limite, un autre paramètre tel le nombre de Richardson doit être utilisé.

## 7. Référence

Zwack, P. et Kabil, M. (1988): Estimating lower tropospheric vertical motion from surface data alone, **Monthly Weather Review, 116**, 795-803.

# ARCHITECTURE DE LA BANQUE DE DONNÉES

PAR

MICHEL DESMARAIS

## TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction .....1
2. Structure des données.....1
2.1 Une représentation uniforme pour STRATUS .....1
2.2 Structure de données pour chaque source.....2
2.2.1 Représentation des sorties du modèle numérique .....2
2.2.2 Observations au sol.....3
2.2.3 Sondages aérologiques.....4
3. Interface fonctionnelle.....6
3.1 Syntaxe formelle de l'interface de la banque de données et mode de fonctionnement.....7
4. Mise en application .....8
4.1 (a) Le module de contrôle.....9
4.2 (b) Le module de sondages .....9
4.3 (c) Le module d'observations au sol.....10
4.4 (d) Le module des sorties du modèle numérique (SMN).....10
5. Performance .....11

## 1. Introduction

Pour effectuer ses prévisions météorologiques, STRATUS utilise les données de sortie du modèle numérique (EFR), des observations au sol ainsi que des sondages aérologiques. Pour une seule journée, la quantité typique de données brutes utilisées à partir de ces sources est de 11Mo. Chacun des blocs de la banque de données contient environ 10 octets, pour un total de 1 100 000 blocs, auxquels nous devons avoir un accès direct (i.e. chacun des blocs doit être accessible en tout temps, peu importe sa position). Il est donc important d'avoir un utilitai de banque de données pouvant manipuler efficacement toutes ces données.

## 2. Structure des données

### 2.1 Une représentation uniforme pour STRATUS

Les données représentées sont des paramètres physiques. Chacun des paramètres physiques peut être répertorié en quatre dimensions: temps, hauteur, latitude et longitude.

De plus, un paramètre physique est aussi identifié selon sa source. Par exemple, le paramètre de température peut prendre des valeurs à partir de sorties du modèle numérique, des sondages ou des observations au sol. Chaque valeur est obtenue à l'aide d'un tuplet de six attributs, tels que décrit au tableau 1.

**Tableau 1**
**Attributs d'un tuplet de STRATUS**

| | Index | Valeurs |
|---|---|---|
| 1 | <source> | {EFR, SA, sondages, etc.} |
| 2 | <paramètre physique> | {température, couverture, etc.} |
| 3 | <temps> | [une valeur relative à un temps donné] |
| 4 | <hauteur> | [altitude] |
| 5 | <latitude> | {[un nombre de degrés], [un symbole comme YUL]} |
| 6 | <longitude> | {[un nombre de degrés], [un symbole comme YUL]} |

Comme mentionné plus haut, un tuplet est formé par six attributs. Un <paramètre-physique>, comme la température, est tiré d'une <source>, soit une sortie de modèle numérique, un sondage ou une observation au sol. Quatre attributs additionnels permettent de situer un bloc dans le temps et l'espace.

Certains de ces attributs sont numériques (<temps>, <hauteur>), certains sont symboliques <source>, <paramètre-physique> et certains peuvent être un mélange des deux (<latitude> et <longitude> lesquels peuvent être aussi bien exprimés en degrés ou par un symbole représentant une station).

## 2.2 Structure de données de chaque source

Plusieurs paramètres physiques comme la température, le point de rosée, etc., peuvent provenir de différentes sources (EFR, observations au sol et sondages) et sont représentées selon un format particulier pour chaque source. Le gestionnaire de la banque de données aura à considérer ces différentes représentations et devra les implanter sous le format standard de représentation mentionné plus haut.

Chartier (1988), Partie A, décrit en détail les différentes représentations pour chaque source. Elles sont brièvement examinées ici.

### 2.2.1 Représentation des sorties du modèle numérique

Les sorties du modèle numérique sont formées d'un en-tête qui contient les attributs 2, 3 et 4 du tableau 1, ainsi que d'autres informations. Suivant cet en-tête, une matrice de nombre représente les valeurs des paramètres physiques sur une grille de surface. La latitude et la longitude d'une valeur sont indiquées par sa position dans la matrice. Voici un exemple de ce type de sorties pour le paramètre de température (TT):

```
LU( 2) 82 TT P 12000 0 0 15 15 1 FE OPRUN 4092089000 1200 0 N 399 80 34375
1524 R16 000054B 59
 0.16475E+02 0.16542E+02 0.16605E+02 0.16341E+02 0.16069E+02
 0.15915E+02 0.16047E+02 0.16279E+02 0.16074E+02 0.15488E+02
 0.14533E+02 0.13468E+02 0.11751E+02 0.84297E+01 0.51802E+01
 0.15769E+02 0.15913E+02 0.16145E+02 0.15931E+02 0.15652E+02
[...]
 LU( 2) 83 TT P 11740 0 0 15 15 1 FE OPRUN 4092089000 1200 0 N 399 80 34375
1524 R16 000054F 59
 0.15989E+02 0.16051E+02 0.16089E+02 0.15822E+02 0.15570E+02
 0.15479E+02 0.15666E+02 0.15925E+02 0.15737E+02 0.15132E+02
 0.14147E+02 0.12991E+02 0.11171E+02 0.78478E+01 0.46402E+01
 0.15273E+02 0.15400E+02 0.15600E+02 0.15370E+02 0.15084E+02
[...]
```

Ce type de sorties peut être facilement emmagasiné sous forme de matrice. Cette matrice contient environ la moitié des 11Mo de données recueillies dans une journée dans une grille de 25 par 25 centrée sur YUL (Dorval) avec 9 niveaux sigma de hauteur (voir Chartier, 1988, Partie A, pour les détails de la grille).

### 2.2.2 Observations au sol

La deuxième source de données provient des observations au sol. Contrairement aux sorties du modèle numérique, ce genre de données n'est pas représenté sous format fixe ou sous forme de matrice. Dans sa forme originale, la représentation est un mélange de formats basés sur des étiquettes-valeurs ainsi que sur la position. Par exemple:

YUL SA 1100 -X M2 BKN 3/8F 9/8/0000/026/F4SF5

est un rapport d'observations (SA) pour la station YUL et au temps 1100Z dans lequel nous retrouvons un plafond mesuré à 200 pieds (M2) ainsi que plusieurs autres informations.

Ce type de rapport peut contenir une variabilité dans ses formats et requiert une analyse syntaxique afin d'être correctement décodé par l'ordinateur. En raison de cette variabilité, les données des observations au sol sont transformées sous le format plus standard suivant:

```
REPORT      IDENT : MEM        LAT : 35.05N LON : 90.00W
DATE TIME : 191600(1551)OBS-TYPE : MANSA  ELEV: 87M
PPPP  1019.7        DD    070   FFF   2     TT    25.0
TDTD  16.0   VV     19.3  N 0   ALT   30.12

REPORT      IDENT : MEM        LAT : 35.05N LON : 90.00W
DATE TIME: 191700(1650)OBS-TYPE : MANSA   ELEV: 87M
PPPP  1019.3        DD    080   FFF   3     TT    27.0
TDTD  14.0   VV     19.3  N 2   H     1372
 ALT                       30.11
```

### 2.2.3 Sondages aérologiques

Finalement, la dernière source de données qui est présentement utilisée par STRATUS provient des sondages aérologiques [1]. Tout comme les observations au sol, le format des rapports de sondages est relativement variable et ne peut être représenté adéquatement sous forme de matrice, bien que tous les paramètres physiques rapportés sont compatibles avec le format en 6 dimensions du tableau 1. Ici encore, une description détaillée du format se retrouve dans Chartier (1988), Partie A. Un exemple de ces données figure au tableau 2.

[1] Les données de type PILOT seront intégrées très prochainement.

Tableau 2

Exemple de données de sondages aérologiques

REPORT IDENT : 72327 LAT : 36.25N LON : 86.57W
DATE TIME : 200000 OBS-TYPE : TEMP ELEV: 180M

| NIVEAU | TYPE | PPP | DD | FFF | TT | DPD | HHH | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | SFC | 997.0 | 040 | 2 | 22.6 | 9.0 | NIL | | |
| 2 | PART | A | 1000.0 | | NIL | NIL | NIL | NIL | 151 |
| 3 | PART | A | 850.0 | 050 | 3 | 13.0 | 20.0 | 1535 | |
| ... | | | | | | | | | |
| 11 | PART | A | 100.0 | 030 | 6 | -69.1 | NIL | 16670 | |
| 12 | TROP | 127.0 | 020 | 10 | -66.5 | NIL | NIL | | |
| 13 | MAX | WND | 272.0 | 025 | 32 | NIL | NIL | NIL | |
| 14 | PART | B | 997.0 | NIL | NIL | 22.6 | 9.0 | NIL | |
| 15 | PART | B | 886.0 | NIL | NIL | 13.0 | 2.6 | NIL | |
| 16 | PART | B | 867.0 | NIL | NIL | 12.0 | 6.0 | NIL | |
| ... | | | | | | | | | |
| 38 | PART | D | 10.5 | NIL | NIL | -43.1 | NIL | NIL | |
| 39 | PART | D | 10.0 | NIL | NIL | -45.9 | NIL | NIL | |
| 40 | PART | D | 7.4 | NIL | NIL | -40.5 | NIL | NIL | |

REPORT IDENT : 72435 LAT : 37.07N LON : 88.77W
DATE TIME : 200000 OBS-TYPE : TEMP ELEV: 126M

| NIVEAU | TYPE | PPP | DD | FFF | TT | DPD | HHH | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | SFC | 1004.0 | | 040 | 3 | 24.8 | 9.0 | NIL | |
| 2 | PART | A | 1000.0 | | NIL | NIL | 23.2 | 13.0 | 164 |
| 3 | PART | A | 850.0 | 070 | 6 | 13.6 | 30.0 | 1552 | |
| 4 | PART | A | 700.0 | 030 | 5 | 8.6 | 30.0 | 3175 | |
| 5 | PART | A | 500.0 | 020 | 13 | -6.7 | 30.0 | 5890 | |
| ... | | | | | | | | | |

Essentiellement, un rapport de sondages aérologiques est formé par une liste qui peut contenir jusqu'à 5 paramètres physiques à différents niveaux de pression. Cette liste est organisée selon le temps et la position de la station.

## 3. Interface fonctionnelle

Comme mentionné plus haut, en dépit des différences dans la représentation des données, elles peuvent être représentées sous un format standard dans un index composé de 6 attributs (voir le tableau 1). L'interface de la banque de données est basée sur cette représentation.

L'insertion et l'extraction des données de la banque de données nécessiteront donc six index. Cependant, l'interface présentement utilisée permet d'inclure d'autres paramètres, dépendant de la situation. L'interface de la banque de données pourvoit des "services", conformément au paradigme de la programmation orientée-objet.

L'appel à l'interface de la banque de données est décrit, plus bas, sous forme générique.

```
db <db> <message> [liste des paramètres]
```

L'utilitaire de la banque de données "db" reçoit comme arguments un identificateur de base de données, <db>, et lui envoie un message, <message> avec une liste des paramètres. Par exemple, pour extraire la température à YUL, le demandeur émettrait l'appel suivant:

```
db db1 fetch sa tt 0 YUL YUL YUL
```

Dans cet appel, la banque de données est <db1> et le message est <fetch>. Les autres paramètres dépendent du message. La source à partir de laquelle le datum est extrait est SA (rapports horaires d'observations au sol) et le paramètre physique extrait est TT (le code pour la température). Les paramètres suivants sont les quatre index de dimension. Le temps, <0>, est relatif au temps initial de la banque de données et est indiqué en heure. La hauteur est ici exprimée comme un symbole représentant la hauteur de la station YUL. La hauteur peut aussi bien être un symbole ou une valeur numérique exprimée en mètres. Les deux derniers paramètres sont la latitude et la longitude. Comme précédemment, ils sont exprimés sous forme de symboles représentant les coordonnées de la station. Ils peuvent aussi être exprimés sous forme de valeur numérique.

## 3.1 Syntaxe formelle de l'interface de la banque de données et mode de fonctionnement

La description des différents "services" offerts par l'utilitaire de la banque de données sont décrits ci-dessous, avec leurs syntaxes formelles. Les symboles non-terminaux sont apposés entre les symboles "plus petit que" et "plus grand que" ("<", ">").

Il est à noter que cette description est sujette à des changements à mesure que les services requis par la banque de données se précisent.

**db <db> load <source> <date>**

Charge les données à partir de <source> pour <date> dans une nouvelle banque de données nommée <db>. Retourne un pointeur à la banque de données nouvellement créée.

**<db> :: [une chaine]**

<db> est le nom de la banque de données qui pourra ultérieurement être utilisée comme référence pour cette structure de données.

**<date> :: <aa> <mm><jj>**

**<source> :: EFR | obs | son**

La source peut être une des trois étiquettes. Elle représente les trois sources mentionnées plus haut: modèle numérique, (EFR), observations au sol (obs), et sondages (son).

**db <db> fetch <source> <var> <temps> <z> <lat> <lon>**

Extrait une <var> de la <source> dans <db>.

**<var> :: all | sa | <paramètre-physique>**

Une <var> représente un paramètre physique. Comme avec d'autres arguments, un mot clé spécial "all" peut être utilisé pour obtenir tous les paramètres physiques disponibles. De plus, une <var> spéciale, "SA", représente un rapport d'observations au sol (ceci comprend un nombre de paramètres physiques observés dans un format familier) qui n'est disponible qu'à partir de la source de données obs.

**<temps> :: all | (x, où x>= 0 et x <= 24)**

Le temps tel que donné par un nombre entre 0 et 24. Il constitue l'heure relative à un temps absolu spécifié au moment du chargement (loading) ("<date>"). Le mot clé "all" extrait l'information pour toutes les heures disponibles dans la banque de données.

**<z> :: all | {x, où x >= 50 et x <=1100}**

L'altitude "z" est le niveau de pression en millibars. Le mot clé "all" extrait l'information pour toutes les altitudes disponibles dans la banque de données.

**<lat>:: {x, où x >= -90 et x<= 90}**

La latitude donnée en degrés.

**<lon> :: {x, où x>= -180 et x<= 180}**

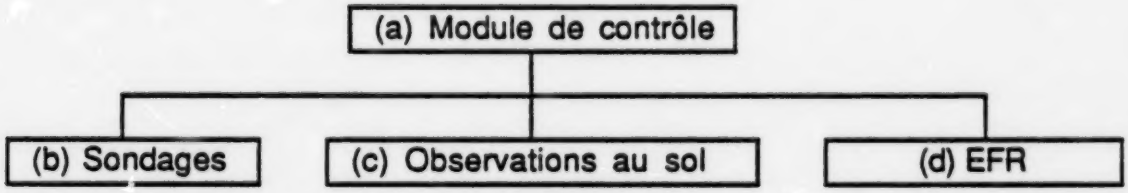
La longitude donnée en degrés.

## 4. Mise en application

La mise en application pour la banque de données présentement utilisée est composée de quatre modules. On y retrouve un module pour chaque type de données (sondage, observations au sol, sorties du modèle numérique) et un module de contrôle qui relie ces derniers avec le demandeur (voir la figure 1).

Figure 1

Architecture de la banque de données




Les trois modules asservis "slave" (b, c, d) sont des processus séparés qui sont créés par le module de contrôle (a). Chacun d'eux communique avec le module (a) grâce à des canaux de communication interprocessus (pipes sur UNIX). Les trois modules asservis reçoivent des messages du module (a) suivant la syntaxe décrite plus bas, alors que le module (a) reçoit des instructions de "stdin" directement du demandeur, lequel peut être un programme d'appel, un autre processus ou l'utilisateur. La syntaxe des messages envoyés au module (a) correspond à la syntaxe décrite à la section précédente.

L'interface fonctionnelle des trois modules asservis est décrite ci-dessous.

### 4.1 (a) Le module de contrôle

Tel que mentionné plus haut, le module de contrôle reçoit des messages suivant la syntaxe décrite précédemment. Présentement, les messages ne peuvent être reçus que de "stdin", mais des mises en application futures pourraient permettre l'utilisation d'une interface en C.

### 4.2 (b) Le module de sondages

Le module de sondages est un processus qui demande un seul argument, le nom de la banque de données. Le programme utilisé en ce moment se nomme "tephi-db". La banque de données analyse les données obtenues de GETDATA, lesquelles sont compressées par le programme "tephi-compress" de façon à réduire la mémoire utilisée par le programme.

Le module de sondage reçoit des messages de "stdin" selon la syntaxe suivante:

**<variable-physique> <temps> <z> <station>**

où:

**<variable-physique> :: level | [une variable physique]**

Une variable physique obtenue à partir des données de sondage (TT, FFF,DD,PPP,DPD, ou HHH) ou le mot clé "level", lequel rapporte toutes les variables disponibles pour un niveau de pression donné.

**<temps> :: all | (x, où x >= 0 et x<24)**

Le temps tel que donné par un nombre entre 0 et 24. Il définit l'heure relative au temps absolu de la banque de données. Le mot clé "all" rapporte tous les temps disponibles.

**<z> :: all | (x, où x>= 50 et x<= 1100)**

L'altitude "z" est un niveau de pression exprimé en millibars. Le mot clé "all" rapporte tous les niveaux disponibles.

**<station> :: [un code numérique de station]**

La station est un nombre qui correspond au code de la station. Par exemple, le code pour YUL est 71627 (le code de trois lettres de la station devrait pouvoir être utilisé avec le module (a)).

### 4.3 (c) Le module d'observations au sol

Le module d'observations au sol est aussi un processus qui demande le nom de la banque de données comme argument. Le nom du programme est "obs-db". La banque de données est composée d'observations au sol obtenues par GETDATA, lesquelles sont compressées par le programme "obs-compress" afin de réduire la mémoire utilisée par le programme.

Le module d'observations au sol reçoit des messages à partir de "stdin" selon la syntaxe suivante:

**<variable-physique> <temps> <station-d'observations>**
où:
**<variable-physique>:: all | [une variable physique]**
Une variable physique obtenue par les données des observations au sol ou le mot clé "all".
**<temps> :: all | (x, où x>= 0 et x <= 24)**
Le temps tel que donné par un nombre entre 0 et 24. Il définit l'heure relative au temps absolu de la banque de données. Le mot clé "all" rapporte tous les temps disponibles.
**<station-d'observations> :: [un code de trois lettres représentant une station]**
Code d'une station comme YUL.

### 4.4 (d) Le module des sorties du modèle numérique (SMN)

Les sorties du modèle numérique est un module qui utilise le nom de la banque de données comme argument. Le nom du programme est "nmo-db". La banque de données contient des données du modèle numérique obtenues de GETDATA, lesquelles sont compressées par le programme "num-db" afin de réduire l'espace utilisé par le programme.

Le SMN reçoit des messages de "stdin" selon la syntaxe suivante:
**<variable-physique> <temps> <z> <latitude> <longitude>**
où:
**<variable-physique> :: [une variable physique]**

Une variable physique.
**<temps> :: "all" | (x, où x >= 0 et x <24)**

Le temps donné par un nombre entre 0 et 24. Il définit l'heure relative au temps absolu de la banque de données. Le mot clé "all" rapporte tous les temps disponibles.

**<latitude> :: (x, où x >= -90 et x <=90)**

La latitude donnée en degrés.

**<longitude> :: (x, où x >= -180 et x <= 180)**

La longitude est donnée en degrés.

## 5. Performance

La performance de la banque de données est critique pour le succès du projet STRATUS. Elle sera largement utilisée par le système expert lui-même ainsi que par les utilitaires fournis à l'usager pour analyser et manipuler les données. Une mauvaise performance peut résulter en une résistance de la part des utilisateurs. Comme il est peu probable que la banque de données subisse des changements significatifs, une bonne performance est attendue même lors de ses premières versions, contrairement au système expert.

La performance globale de la banque de données est détaillée au tableau 1. Les temps correspondent aux données d'une journée sur un poste de travail SUN SPARC. Le temps de chargement de chaque module varie entre 0.3 et 3 secondes. Donc, le temps de chargement total pour tous les modules est d'environ 10 secondes. Une fois chargé, l'extraction d'un bloc requiert généralement moins de 10 millisecondes puisque toutes les données sont gardées en mémoire. L'extraction interactive rapporte le temps utilisé pour l'extraction d'un bloc en mode interactif, c'est-à-dire, quand le module est appelé de façon interactive à partir d'une coquille par l'utilisateur.

Tableau 1

Performance de la banque de données

(les temps sont en ms pour un poste de travail SUN SPARC)

| | Modules | | |
|---|---|---|---|
| | Obs | Son | EFR |
| Temps de chargement | 3200 | 300 | 3000 (approx.) |
| Extraction interactive | 7 | 9 | 1 (approx.) |
| Exigences de mémoire du programme | 560Ko | 250Ko | 1000Ko (approx.) |
| Espace approximatif des données | 1Mo | 0,1Mo | 3Mo |

# COMPRESSION DES SORTIES DU MODÈLE EFR

PAR

YVES CHARTIER

# TABLE DES MATIÈRES

1 Introduction ..... 1
2 Motivation ..... 1
3 Description de la méthode ..... 3
3.1 Théorie ..... 3
3.2 Description des opérations ..... 4
3.3 Implantation et utilisation ..... 5
3.4 Exemple d'application ..... 8

## 1 Introduction

Les sorties du modèle EFR sont archivées au Centre météorologique canadien (CMC) par un progiciel connu sous le nom de "fichiers standards". Ce progiciel, développé par la division de Recherche en Prévision Numérique (DRPN), est spécifiquement adapté pour la sauvegarde et la manipulation des sorties des modèles numériques.

Présentement, le progiciel des fichiers standards n'est pas supporté sur les SUN ou sur les VAX du CRIM. Il nous a donc fallu développer une méthode alternative de représentation des sorties du modèle. Le présent document a pour objet de présenter cette méthode.

## 2 Motivation

La première approche développée pour importer les sorties du modèle EFR a été de représenter les données aux points de grille sous forme décimale ASCII. Pour représenter un nombre point-flottant avec une précision suffisante, 13 caractères sont nécessaires: un pour le signe, 2 pour le zéro et le point, 5 pour la mantisse, 4 pour l'exposant et 1 pour l'espace entre les nombres. Par exemple une température de -10.354 °C peut être représentée par la chaîne de caractères "-0.10354e+02".

Les valeurs aux points de grille des différents champs prévus par le modèle peuvent être représentées par une suite séquentielle de nombres points-flottants représentés sous forme décimale ASCII. Un exemple d'une telle suite figure à la page 5 du présent document.

Durant la phase I du projet, une grille de dimension 15x15 a été utilisée. A 13 caractères par nombre, l'ensemble des valeurs contenues dans la grille demande près de 3000 caractères. La quantité de grilles extraites du modèle, en coordonnées sigma et en coordonnées de pression, se chiffre à près de 1100. L'ensemble des sorties du modèle, pour un cas donné, constitue un fichier de l'ordre de 3.3 mégaoctets. Les moyens de communications couramment disponibles, nous limitaient à une vitesse de transmission de 2400 bauds. A un taux de transmission d'environ 250 caractères secondes, il fallait environ 13,200 secondes (soit près de 4 heures) pour transférer un tel fichier.

Le transfert de fichiers aussi volumineux présentait de nombreux inconvénients. La transmission d'un fichier, sans perte de données, demandait que le réseau informatique du CRIM, le réseau DATAPAC et le CYBER 930 du CMC fonctionnent tous sans interruption d'aucune sorte durant une période de 4 heures. La dimension des fichiers posait aussi un problème au niveau de l'espace-disque requis.

Nous avons jugé que ces inconvénients justifiaient l'implantation d'algorithmes de compression des sorties du modèle.

# 3 Description de la méthode

## 3.1 Théorie

Les 128 caractères disponibles selon la norme ASCII permettent, en théorie, de représenter des nombres en base 128 plutôt qu'en base 10. Par exemple, le nombre 8385 peut être représenté comme étant "AA" en base 128, le caractère "A" représentant le nombre 65.

L'utilisation des 128 caractères ASCII disponibles pose certains problèmes lors de l'utilisation de logiciels de communication, certains caractères "de contrôle" pouvant être utilisés par les logiciels pour gérer la transmission des données. Afin de contourner ce problème, nous avons choisi un sous-ensemble du jeu de caractères ASCII contenant 90 éléments, allant du symbole "!" (code ASCII 33) au symbole "z" (code ASCII 122). Ce sous-ensemble ne contient aucun caractère de contrôle. Ce jeu de caractères permet de représenter des nombres en base 90. Il est possible avec 2 caractères de représenter un nombre entre 0 ("!!") et 8099 ("zz").

Une étude de la nature des champs météorologiques montre que cette gamme de valeurs est suffisante pour représenter, avec une précision comparable à celle des erreurs d'observation, la *variation* des champs sur l'ensemble de la grille. Par exemple, la série d'entiers comprise entre 0 et 8099 permet de représenter sur l'ensemble de la grille

- une *variation* de température de 80.99°C, avec une précision de ±0.01°C,
- une *variation* de pression de 809.9 millibars, avec une précision de ±0.1 mb,
- une *variation* de vents de 809.9 noeuds, avec une précision de de ±0.1 noeud.

Cette représentation réduit par 6.5 l'espace nécessaire à la représentation des sorties du modèle, et par le même facteur le temps requis au transfert des données. Il est à noter que la précision de cette représentation est inversement proportionnelle à la variabilité du champ; par exemple un champ de température dont la *variation* serait de 25°C pourrait être représenté avec une précision de l'ordre de ±0.0031°C. Cette précision s'avère suffisante pour ne pas entraîner de perte d'informations significatives.

## 3.2 Description des opérations

Voici la liste des opérations nécessaires à la compression des données:

- calcul de la variation du champ sur la grille (différence entre la valeur maximale et la valeur minimale),
- calcul de la valeur entière, pour chaque point de grille, de la différence entre la valeur au point de grille et la valeur minimale,
- représentation en base 90 de la valeur entière calculée

A la page 5 figure une application des algorithmes de compression sur la prévision 00 heures d'un champ de pression au sol, pour le cas du 12 octobre 1989 à 12Z. Une analyse des valeurs du champ permet d'initialiser les valeurs suivantes (en millibars):

| | |
|---|---|
| Valeur maximale: | 1.023800e+03 |
| Valeur minimale: | 9.393200e+02 |
| Variation du champ: | 8.448000e+01 (Val. maximale - Val. minimale) |
| Nombre d'entiers disponibles: | 8100 |
| Facteur de conversion: | 9.586887e+01 (Nombre d'entiers / Variation du champ) |

La valeur du premier élément de la grille, au point [0,0] est de 9.71570E+02 millibars. La différence entre la valeur de cet élément et la valeur minimale, ramenée entre 0 et 8099, est de 3091.

Ce nombre doit ensuite être converti en base 90, puis en caractères ASCII. Par exemple, le nombre 3091 peut être décomposé comme étant 34*90 + 31, que l'on peut représenter en caractères ASCII par la chaîne "C@".

Il est à noter que la conversion en caractères ASCII des nombres représentés en base 90 nécessite une translation de 33 caractères, de sorte que la valeur 0 soit représentée par le caractère "!" (code ASCII 33) au lieu du caractère "NUL" (code ASCII 0).

## 3.3 Implantation et utilisation

### CMC (CYBER-930, environnement NOS-VE)

Dans les lignes qui suivent nous supposons que l'usager est connecté au CYBER-930 sous l'identité **ARMFCRM**, et qu'il se trouve dans le répertoire **$user.wait_queue**.

Les algorithmes de compression ont été implantés dans le programme C **compmod**. Le code source de ce fichier se trouve dans le répertoire **$user**, dans le fichier **compmod_c**. Le code objet se trouve dans le répertoire **$user.wait_queue**, dans le fichier **compmod**.

Pour exécuter le programme, il faut d'abord le compiler, en tapant la commande

**c $user.compmod_c b=compmod**

Le paramètre "b=" permet de choisir le nom de la version exécutable du programme. C'est l'équivalent de l'option "**-o**" de la commande "cc" d'UNIX. Le programme doit être recompilé à chaque nouvelle session; il semble que ce soit le seul moyen d'obtenir la permission de l'exécuter. Autrement, NOS-VE donne un message d'erreur, se plaignant du fait que le lien avec les librairies "run-time" n'a pas été fait. Il manque probablement une commande dans le fichier **PROLOG** (l'équivalent du fichier "**.profile**" d'UNIX) qui permet de faire cette association à la connexion. Ce problème n'a pas été corrigé étant donné que nous n'avions pas la documentation disponible, et que nous avons volontairement décidé de consacrer un minimum de temps à l'apprentissage de NOS-VE.

Une fois la compilation terminée, le programme peut être démarré par la commande

**exet compmod**

L'acronyme **exet** est un diminutif de **execute_task**. Peu de temps après avoir tapé la commande, le programme demande à l'usager d'entrer le nom d'un fichier à convertir:

**Entrez le nom d'un fichier:**

L'usager doit alors entrer le nom d'un fichier contenant les sorties du modèle en format décimal ASCII. Typiquement ce fichier sera celui retourné dans le répertoire **$wait_queue** par les programmes **sigma** ou **pression**. Les sorties compressées du fichier sont conservées dans un fichier dont le nom est celui donné par l'usager et auquel on ajoute le suffixe "_Z"[1]. Par exemple, si le nom du fichier d'entrée est **sigma_102312**, la version compressée du fichier sera conservée dans le fichier **sigma_102312_Z**. Il peut être utile de mentionner que la performance du CYBER-930 se rapproche plus de celle de nos bons vieux μVAX que de celle du CRAY. La compression des sorties du modèle peut prendre de 5 à 10 minutes.

En plus de représenter les sorties du modèle dans un format compressé, le programme se trouve aussi à éliminer plusieurs informations superflues contenues dans le fichier original (messages du programme PGSM, code source FORTRAN, statistiques de compilation, sommaire comptable du CRAY, etc). Auparavant il fallait éliminer ces messages en éditant le fichier.

### CRIM (SUN, environnement UNIX)

Au CRIM les algorithmes de compression ont été implantés dans deux programmes écrits en C, soit **compmod**, qui compresse les fichiers déjà transférés sous forme décimale ASCII, et **uncompmod**, qui remet les fichiers déjà compressés dans leur format original.

Pour accéder à ces programmes, il faut se connecter à **harry** dans le compte **meteo**. L'usager devrait normalement se trouver dans le répertoire **/home/harry/meteo**. Les versions exécutables des programmes se trouvent dans le répertoire **/home/harry/meteo/bin**. Le code source se trouve actuellement dans le répertoire **/home/harry/chartier/src**, dans les fichiers **compmod.c**, **uncompmod.c** et **compression.c**. Le fichier **compression.c** contient les routines de compression et de décompression.

L'appel au programme **compmod** se fait de la façon suivante:

**compmod nom-fichier-entree**

---

[1]Cette stratégie a été inspirée des utilitaires UNIX **compress** et **uncompress**.

où **nom-fichier-entree** est un fichier qui contient les sorties du modèle dans un format décimal ASCII. Les champs compressés apparaîtront par défaut à l'écran. Pour sauvegarder les champs compressés dans un fichier, il faut utiliser les commandes de redirection. La commande suivante envoie les sorties compressées du modèle dans le fichier **nom-fichier-sortie**.

**compmod nom-fichier-entree > nom-fichier-sortie**

Le programme peut aussi être appelé en utilisant des "pipes":

**compmod < nom-fichier-entree > nom-fichier-sortie**

**cat nom-fichier-entree-1 nom-fichier-entree-2 | compmod > nom-fichier-sortie**

## 3.4 Exemple d'application

**Prévision 00 heures du champ de pression à la surface avant compression, pour le cas du 12 octobre 1989 12Z**

```
LU(  2)  649 PG P     0     0     0    15    15    1 FE OPRUN 3101289120  1200     0  M  399   00 34375  1524 R16 0000E27    59
0.97137E+03  0.98372E+03  0.98944E+03  0.98660E+03  0.98421E+03
0.98427E+03  0.98461E+03  0.98496E+03  0.98422E+03  0.98192E+03
0.97763E+03  0.96853E+03  0.96437E+03  0.96616E+03  0.96837E+03
0.98727E+03  0.97199E+03  0.98534E+03  0.98516E+03  0.98363E+03
0.98352E+03  0.98201E+03  0.98271E+03  0.98244E+03  0.97590E+03
0.97070E+03  0.97035E+03  0.97161E+03  0.97170E+03  0.97148E+03
0.96345E+03  0.96296E+03  0.97601E+03  0.98162E+03  0.98327E+03
0.98491E+03  0.98461E+03  0.98512E+03  0.97738E+03  0.96662E+03
0.96668E+03  0.97499E+03  0.97929E+03  0.97790E+03  0.97626E+03
0.98630E+03  0.96927E+03  0.96777E+03  0.97270E+03  0.97598E+03
0.98142E+03  0.98241E+03  0.98240E+03  0.97549E+03  0.96617E+03
0.96851E+03  0.97930E+03  0.98523E+03  0.98511E+03  0.98391E+03
0.10089E+04  0.99549E+03  0.98241E+03  0.97232E+03  0.96794E+03
0.97903E+03  0.98369E+03  0.97679E+03  0.97425E+03  0.96917E+03
0.97100E+03  0.98133E+03  0.98906E+03  0.99007E+03  0.98872E+03
0.10206E+04  0.10164E+04  0.10047E+04  0.98569E+03  0.97177E+03
0.98070E+03  0.98832E+03  0.98226E+03  0.97414E+03  0.96816E+03
0.96964E+03  0.97653E+03  0.98142E+03  0.98247E+03  0.98283E+03
0.10236E+04  0.10224E+04  0.10153E+04  0.99775E+03  0.97832E+03
0.97661E+03  0.98398E+03  0.98565E+03  0.97613E+03  0.96591E+03
0.96481E+03  0.96661E+03  0.96653E+03  0.96711E+03  0.96874E+03
0.10238E+04  0.10236E+04  0.10213E+04  0.10105E+04  0.99040E+03
0.97565E+03  0.97386E+03  0.98144E+03  0.97617E+03  0.96680E+03
0.96429E+03  0.95906E+03  0.95178E+03  0.95087E+03  0.95559E+03
0.10236E+04  0.10238E+04  0.10233E+04  0.10197E+04  0.10076E+04
0.98860E+03  0.97129E+03  0.97389E+03  0.97515E+03  0.96908E+03
0.96494E+03  0.95310E+03  0.94128E+03  0.93932E+03  0.94653E+03
0.10233E+04  0.10235E+04  0.10236E+04  0.10229E+04  0.10195E+04
0.10092E+04  0.98906E+03  0.97856E+03  0.97751E+03  0.97602E+03
0.96956E+03  0.95474E+03  0.94284E+03  0.93951E+03  0.94397E+03
0.10227E+04  0.10229E+04  0.10230E+04  0.10230E+04  0.10228E+04
0.10211E+04  0.10115E+04  0.99672E+03  0.98694E+03  0.98574E+03
0.98437E+03  0.96843E+03  0.94960E+03  0.94335E+03  0.94572E+03
0.10221E+04  0.10222E+04  0.10223E+04  0.10222E+04  0.10221E+04
0.10216E+04  0.10171E+04  0.10072E+04  0.99881E+03  0.99453E+03
0.99437E+03  0.98370E+03  0.95891E+03  0.95093E+03  0.95288E+03
0.10215E+04  0.10216E+04  0.10215E+04  0.10212E+04  0.10204E+04
0.10191E+04  0.10141E+04  0.10081E+04  0.10085E+04  0.10116E+04
0.10114E+04  0.99936E+03  0.97195E+03  0.96193E+03  0.96466E+03
0.10210E+04  0.10210E+04  0.10206E+04  0.10199E+04  0.10184E+04
0.10160E+04  0.10118E+04  0.10069E+04  0.10061E+04  0.10142E+04
0.10175E+04  0.10116E+04  0.99135E+03  0.97724E+03  0.98179E+03
0.10206E+04  0.10203E+04  0.10196E+04  0.10183E+04  0.10160E+04
0.10125E+04  0.10087E+04  0.10051E+04  0.10051E+04  0.10095E+04
0.10125E+04  0.10128E+04  0.10048E+04  0.99082E+03  0.99204E+03
```

**Le même champ de surface, après compression.**

```
LU(  2)  649 PG P     0     0     0    15    15    1 FE OPRUN 3101289120  1200     0  M  399   00 34375  1524 R16 0000E27    59
MAX: 1.023800e+03 MIN: 9.393200e+02 FACTEUR: 9.586887e+01 BASE: 90
C@P;VCBAPjPpQ6QXPkWCIi@+;^=V7u
4+CiA"QkP2P(MKO4NtGwBGB%CDCHC@
:':lH(N&OjQSQ6QqIQ>(>-FzKTJ)H@
S8@r?<DS8%HmMqNqGP~W@)XUQCQIPN
k+\kMuDA7LK;P8K#F3@hBdMdV!W4UX
uUs*fZADC3N(U2NcF)7aA;HZMmWvO@
zfyMqu_6JQRaPTR@M3=><.>'=y?W@7
zzzfA>Ijm&0_EnWmA7>9;V&0.9=<2>
zfzzz]vXibUMC%EkG/AR<;/^0(||(`
zJz]zfz@vEXNUyJhI"M)A41G@@|3%v
yjz@z=s=ytA=mp^-8dRIPy@|=v%;'j
yly:yDy:ylx{mmi<`B|b|fP9$o-@/N
xQx{xQM4wUuyp\j@j_mzmg`vCa9(>,
x|x|wUvlu6r^nJhyj@pet:mxXGIDM6
wUv8vOu,r^nwjry'g'kemve9fdWnY/
```

# PROGRAMMES UTILITAIRES

PAR

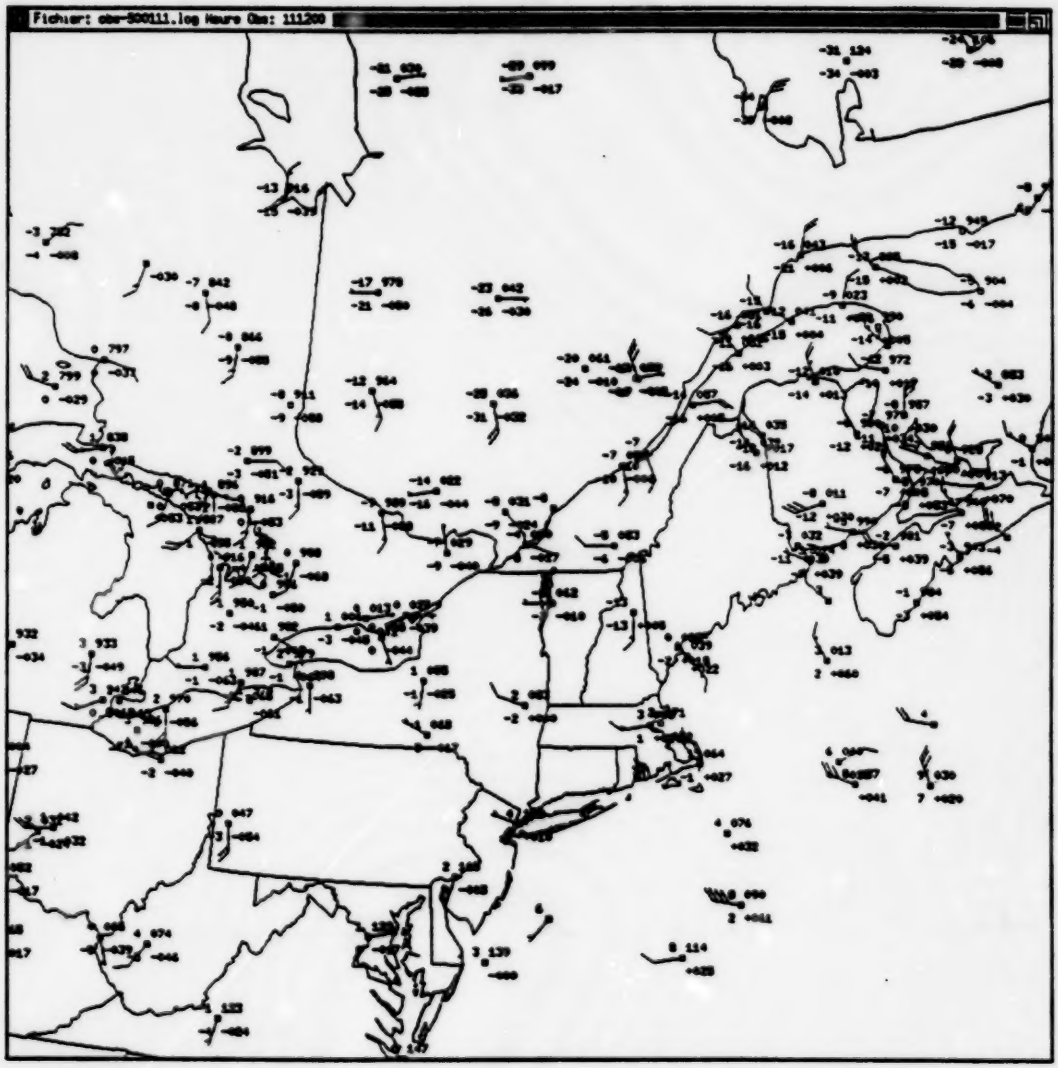
YVES CHARTIER

# TABLE DES MATIÈRES

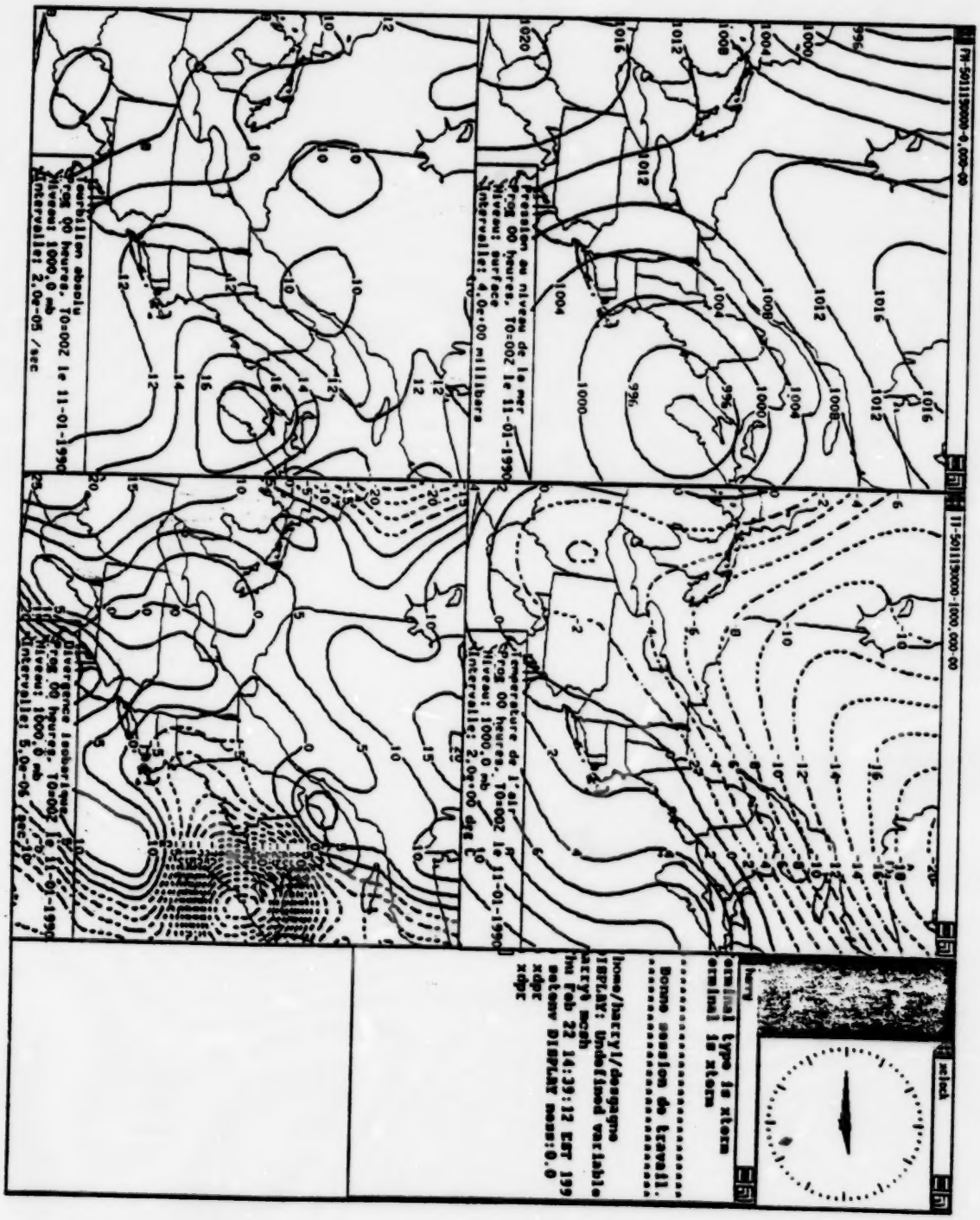
OBSERVATIONS DE SURFACE
Des observations de surface sont représentées sur des cartes..... 1

CONTOURS
Des matrices de données qui sont représentées sur des cartes avec isolignes..... 2

# OBSERVATIONS DE SURFACE



CONTOURS


Pression au niveau de la mer
Prog 00 heures. T0=002 le 11-01-1990
Niveau surface
Intervalle: 4.0e+00 millibars
Température de l'air
Prog 00 heures. T0=002 le 11-01-1990
Niveau: 1000.0 mb
Intervalle: 2.0e+00 deg C
Tourbillon absolu
Prog 00 heures. T0=002 le 11-01-1990
Niveau: 1000.0 mb
Intervalle: 2.0e-05 /sec
Divergence isobarique
Prog 00 heures. T0=002 le 11-01-1990
Niveau: 1000.0 mb
Intervalle: 5.0e-06 /sec
Bonne session de travail.
/home/barryl/dessins
DISPLAY: Undefined variable
barryl mach
Thu Feb 22 14:39:12 EST 199
setenv DISPLAY mach:0.0
xdpr
xdpr